

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ



**КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ  
85 ЛЕТ**

**ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК**

МОСКВА 2016



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ  
85 ЛЕТ

ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК

МОСКВА  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова  
2016

УДК 82-96; 82-4  
ББК 72.4(2)

Авторский коллектив: А.Ф. Александров, В.Л. Бычков, С.А. Двинин, Е.Ю. Зыкова, И.Н. Карташов, Е.А. Кралькина, М.В. Кузелев, Э.И. Рау, Н.Ф. Савченко, В.А. Черников, В.С. Черныш, В.М. Шибков, В.В. Хвостов.  
КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ. ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК. — М.: Физический факультет МГУ, 2016. 88 с.

Этот небольшой сборник посвящен 85-летию кафедры физической электроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. В сборнике отражена история кафедры за последние 50 лет и современное состояние научных исследований.

Сборник полезен для историков отечественной науки и образования как описание развития физической электроники в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова.

Печатается по решению коллектива кафедры физической электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Коллектив кафедры благодарит Председателя совета директоров ОАО «Тензор» А.А. Андреева (выпускника кафедры) за спонсорскую помощь в издании этого сборника.

Подписано в печать 6.12.2016 г.  
Формат А4. Объем 5,5 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Отпечатано в типографии ООО «Флай-арт»  
Москва, пр. Мира, 49

© Коллектив авторов, 2016 г.  
© Физический факультет МГУ  
им. М.В. Ломоносова, 2016 г.



## **Дорогие друзья, коллеги!**

Прежде всего хотелось бы поздравить тысячи выпускников, которые обучались на нашей замечательной кафедре, и ещё много тысяч специалистов-физиков, ученых, инженеров в нашей стране и за рубежом, чья деятельность в той или иной мере связана с ней, со славным Юбилеем.

Нам есть чем гордиться. С момента создания кафедре включилась в решение важнейших задач по индустриализации страны. Именно на нашей кафедре были заложены основы для успешного развития физики плазмы, электронной микроскопии и физической электроники в нашей стране. Работы Н.А. Капцова, Г.В. Спивака, Э.М. Рейхруделя, В.Л. Грановского, А.Ф. Александрова, А.А. Рухадзе, А.А. Кузовникова, В.Е. Юрасовой, Е.М. Дубининой и их учеников вывели научные исследования на кафедре на передовые рубежи мировой науки.

История кафедры с момента её основания нашла полное отражение в книге, изданной к 50-ти летнему Юбилею физического факультета. Поэтому в настоящем Юбилейном сборнике мы решили отразить историю развития научных исследований на кафедре, начиная с 60-х годов прошлого века.

Круг проблем, которые решались на кафедре в эти годы, чрезвычайно широк и разнообразен. Сфера интересов кафедры представляет собой обширную область физики, изучающую основные закономерности явлений, возникающих при взаимодействии носителей заряда (электронов и ионов) как друг с другом, так и с различными средами. Эти носители образуют газоразрядную плазму и плазму твердых тел (металлы, полупроводники и т.д.). Изучение раз-

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

нообразных процессов и явлений в плазменных средах, эффектов, сопровождающих облучение поверхности электронами и ионами, представляет собой физическую основу создания различных устройств и приборов современной техники – от мощных источников излучения до плазменно-пучковых технологий создания элементов современной микро- и наноэлектроники.

В настоящее время на кафедре работает 41 сотрудник, среди которых 9 докторов и 19 кандидатов наук. Научные исследования на кафедре проводятся в рамках сотрудничества с институтами РАН, Зеленоградским научным центром, рядом научных центров Европы и Юго-Восточной Азии.

Кафедра располагает большим парком современного научного оборудования:

- растровые электронные микроскопы;
- Оже- и КР-спектрометры;
- рентгеновские микроанализаторы;
- ускорители тяжелых ионов;
- сверхвысоковакуумные камеры, оснащенные масс-спектрометрами и источниками ионов и электронов;
- установки для лазерного, ионно-лучевого и плазменного напыления тонких пленок;
- установка для изучения ВЧ разряда низкого давления;
- стенд для создания СВЧ разряда в сфокусированном волновом пучке в свободном пространстве;
- стенды для создания плазмы импульсным током для изучения влияния разряда на распространение ударных волн, и инициацию горения в горючей смеси;
- канал для создания течения газа (инертного, воздуха или горючей смеси) для изучения влияния разряда на поток и инициацию горения в канале.

На кафедре ведется подготовка студентов и аспирантов по специальностям «Физика плазмы» и «Физическая электроника». Преподают свыше 20 специальных курсов, работают 3 специальных практикума. Наряду с основными курсами читается блок лекционных курсов, ориентированных на изучение физических основ современных технологий микро- и наноэлектроники и материаловедения.

Кафедра обеспечивает работу докторского диссертационного совета Д 501.001.66.

Сотрудники кафедры участвуют в работе различных советов РАН, Минобрнауки РФ; являются членами редколлегии ряда научных журналов, членами программных и оргкомитетов многих международных и всероссийских конференций по тематике научной работы кафедры. Наша кафедра – один из основных организаторов международных конференций «Взаимодействие ионов с поверхностью» и «Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу».

Доктор физ.-мат. наук, профессор В.С. Черныш

## КАФЕДРА СЕГОДНЯ

Большую организационную работу на кафедре выполняют



Заместитель заведующего кафедрой по научной работе старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук Наталья Федоровна Савченко



Заместитель заведующего кафедрой по учебной работе, доцент, кандидат физико-математических наук Игорь Николаевич Карташов



Секретарь кафедры  
Вера Федоровна Беклешова



Секретарь ГЭК  
Ольга Петровна Коробова

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

На кафедре функционируют два научных семинара:  
по физике плазмы и газовых разрядов      по твердотельной электронике



Руководитель научного семинара  
по физике плазмы и газовых разрядов  
профессор М.В. Кузелев



Руководитель научного семинара  
по твердотельной электронике  
профессор Э.И. Рау



Секретарь научного семинара  
по физике плазмы и газовых разрядов  
доцент, д.ф.-м.н. С.А. Двинин



Секретарь научного семинара  
по твердотельной электронике  
м.н.с., к.ф.-м.н. А.Е. Иешкин



ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК – 2016

## НА НАУЧНОМ СЕМИНАРЕ КАФЕДРЫ



1996 г.



2016 г.

## ИЗ ИСТОРИИ КАФЕДРЫ

Научной основой, на которой выросла кафедра, явились классические работы выдающихся профессоров Московского университета – А.Г. Столетова по фотоэффекту, П.Н. Лебедева по колебаниям и волнам и, наконец, работы С.А. Богуславского по кинетике электронов в электрических и магнитных полях.



Со дня основания кафедры в 1931 г. по 1966 г. кафедрой заведовал ее основатель – ученик П.Н. Лебедева профессор Н.А. Капцов.

**Николай Александрович Капцов** (03.02.1883–10.02.1966) окончил физико-математический факультет Московского государственного университета в 1904 году с дипломом Первой степени. В течение последующих двух лет он работал в лаборатории Петра Николаевича Лебедева, готовясь к получению профессорского звания. Его исследования были посвящены дифракции волн.

В 1906 году Николай Александрович был призван в армию по мобилизации, а по завершению службы посвятил себя развитию торгово-промышленного предприятия семьи. В 1914 году был опять призван в армию. В декабре 1917 года Н.А. Капцов был демобилизован из-за близорукости и смог вернуться к занятиям физикой.

Исследования этих лет были посвящены генерации ВЧ колебаний в триоде. В частности, в его расчетах было обнаружено явление фазовой фокусировки и формирования электронных сгустков в электронном пучке, изучена сравнительная роль колебаний электронов в триоде и внешнего колебательного контура в генерации электромагнитных колебаний. В это время его дипломником был Самсон Давидович Гвоздовер, который в сентябре 1946 года стал первым заведующим отделением радиофизики и электроники.

В 1928 году Николай Александрович, став заведующим электрофизической лаборатории МЭЛЗ, увлекся развитием вакуумной техники, а также электронных и ионных приборов. Тематика этих исследований была настолько важна для развития техники, что в 1931 году сразу после образования физического отделения МГУ была создана и кафедра электронных и ионных процессов МГУ, которой (под разными названиями) он заведовал до 1966 года. В довоенный период кроме С.Д. Гвоздовера в лаборатории Н.А. Капцова дипломные работы выполняли Г.В. Спивак и Э.М. Рейхрудель. Под руководством и по инициативе Николая Александровича на кафедре были выполнены фундаментальные исследования пробоя в газе в постоянном и переменном полях и практически для всех типов газового разряда – разряда с накалимым катодом, тлеющего, коронного, (разработаны электрофилтры), высокочастотного и

сверхвысокочастотного разрядов, разряда в вакууме и при сверхвысоком давлении. Он руководил исследованиями по термоэлектронной, вторичной, фотоэлектронной и экзоэлектронной эмиссии.

Николай Александрович возглавлял комиссии по оборудованию факультета и по защите лабораторий от электромагнитных помех при строительстве Нового здания Московского университета. В Московском университете читал курсы: «Электрические явления в газах и вакууме», «Электроника», «Радиофизическая электроника». Доктор наук с 1935 г., ученая степень присуждена без защиты диссертации<sup>1</sup>. Награжден орденами Ленина (1953), «Знак Почета» (1940) и медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг.» (1946), «В память 800-летия Москвы» (1948). Заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1964). Н.А. Капцов подготовил свыше 20 кандидатов наук. Основные труды: «Электрические явления в газах и вакууме» (2-е изд., М.: Гостехиздат, 1950, 836 с.); «Коронный разряд и его применение в электрофильтрах» (М.: Гостехиздат, 1947, 226 с.); «Электроника» (2-е изд., М.: Гостехиздат, 1956, 459 с.).

В 1966 году кафедру возглавил **Григорий Вениаминович Спивак** (02.11.1900–20.11.1989).

Г.В. Спивак окончил физико-математическое отделение Московского университета в 1927 году. Научной работой с 1926 года занимался в лаборатории Н.А. Капцова. В 1928 – 29 гг. проходил научную стажировку в Германии (г. Кенигсберг). Его первые работы были посвящены взаимодействию пространственного заряда электронов и положительных ионов. Последующие работы Г.В. Спивака были посвящены изучению обмена энергией между молекулами и стенкой.

Далее была показана существенная роль метастабильных атомов в балансе плазмы и катодных частей разряда, исследованы характеристики разряда в магнитном поле и построена теория электрических зондов в магнитном поле.

Учет функции распределения электронов по скоростям, проводившийся Г.В. Спиваком в исследованиях магнетрона и эффектов магнитного поля в плазме и в вакууме, привел в 1948 г. к разработке общего метода нахождения функций распределения для неравновесных, но стационарных систем при наличии явлений переноса. Функцию распределения можно найти в весьма сложных системах, в которых имеются градиенты температуры, концентрации и действуют одновременно электрические и магнитные поля.



<sup>1</sup>) Современная система ученых степеней была введена постановлением СНК СССР от 13 января 1934 года.

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

Понимая важность изучения процессов взаимодействия плазмы с электродами и стенками разрядных устройств Григорий Вениаминович начинает разработку электронных микроскопов. Для решения этой задачи в 1947 году создается новая кафедра электронной оптики и осциллографии, которая после переезда факультета в новое здание на Ленинских горах вошла в состав кафедры электроники. В 1949–1952 гг. были разработаны электронно-оптические системы, позволяющие получать изображения объектов при атмосферном давлении, а также в условиях газового разряда высокого и низкого давлений. С 1959 г. разрабатываются проблемы контраста изображений разного рода объектов в эмиссионных, зеркальных и растровых системах. По инициативе Г.В. Спивака группой сотрудников на кафедре были начаты исследования распыления твердых тел под действием ионных потоков.

В начале 60-х годов Г.В. Спивак с учениками продолжил разработку нового направления – стробоскопической электронной микроскопии, предназначенной для исследования локальных, периодических во времени, быстропротекающих процессов на поверхностях и в микрообъемах твердых тел. Под его руководством были созданы стробоскопический вторично-эмиссионный, зеркальный, растровый и просвечивающий микроскопы.

Доктор физико-математических наук, профессор (1935). Лауреат Ломоносовской премии I степени (1972). Лауреат премии им. С.И. Вавилова III степени Научно-технического общества приборостроительной промышленности СССР (1962). Награжден Малой золотой (1959) и бронзовой (1960) медалями Выставки достижений народного хозяйства СССР.

Один из авторов открытия явления разрыва доменных границ в процессе импульсного перемагничивания тонких магнитных пленок (совм. с Р.В. Телесниным, О.С. Колотовым, В.И. Петровым и др., открытие №159, 1975). С помощью растрового электронного микроскопа исследованы лунные грунты, получены снимки, по которым удалось составить картину микроструктуры лунного реголита. Имеет 30 авторских свидетельств.

Подготовил более 50 кандидатов и докторов наук. В Московском университете создал и читал курсы лекций по физической электронике, электронной микроскопии, газокинетическим проблемам. Опубликовал более 300 научных работ. Основные труды: «Электронная микроскопия» (под ред. А.А. Лебедева, М.: Гостехиздат, 1954, 636 с.); «Радиофизическая электроника» (под ред. Н.А. Капцова, М.: МГУ, 1960, 561 с.); «Специальный физический практикум» (т. 1, Радиофизика и электроника, ред., М.: МГУ, 1960, 601 с.); «Практикум по твердотельной электронике» (ред., совм. с В.И. Петровым, М.: МГУ, 1984, 392 с.).

**Петров Виктор Иванович** (14.08.1935–04.05.2007). Исполнял обязанности заведующего кафедрой физической электроники в 1985 г. Окончил радиотехнический факультет Московского энергетического института (1959).

В 1965 г. поступил в аспирантуру физического факультета МГУ имени

М.В.Ломоносова, после окончания которой работал на кафедре физической электроники. Научные интересы В.И. Петрова были связаны с изучением магнитных материалов с помощью зеркальной, просвечивающей и растровой электронной микроскопии. В 1970 – 72 гг. выполнил цикл работ по исследованию методом стробоскопической электронной микроскопии процессов быстрого перемагничивания пермаллоевых пленок и обнаружил новое явление: разрыв доменных стенок при перемагничивании импульсами наносекундной длительности и большой скважности (в авторском коллективе, упомянутом выше).

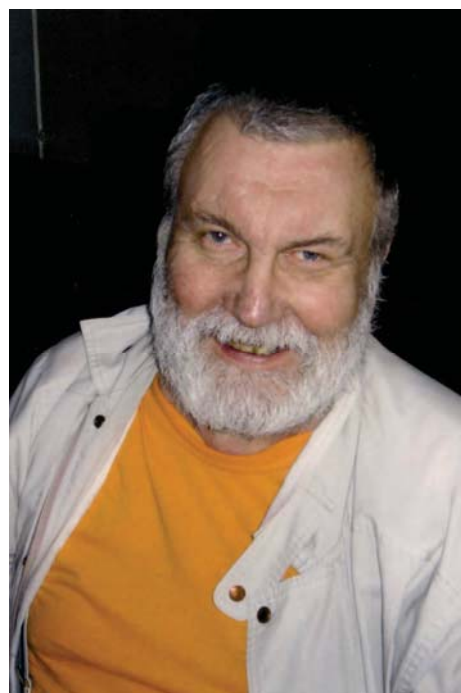
В 70-е годы Виктор Иванович переключился на исследования в области полупроводниковой оптоэлектроники и стал одним из основоположников нового направления — катодолюминесцентной микроскопии полупроводников при низких температурах.

Доктор физико-математических наук (1990). Профессор (1994). Доцент кафедры физической электроники физического факультета (1982). Лауреат Ломоносовской премии I степени (1972). Член диссертационных советов при МГУ (1990–2000, 2001). В Московском университете читал курсы: «Электронная оптика», «Электронная микроскопия», «Физические основы электронной микроскопии и микроанализа».

Член Научного совета РАН по электронной микроскопии (1969). Член редколлегии журналов «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования» (1995) и «Известия РАН. Сер. Физическая» (2001). Подготовил девять кандидатов наук. Опубликовал более 160 научных работ. Основные труды: «Электронная микроскопия магнитной структуры тонких пленок» (совм. с Г.В. Спиваком и О.П. Павлюченко, УФН, 1972, **106** (2), 229–278); «Катодолюминесцентная микроскопия» (УФН, 1996, **166** (8), 859–871).

В 1985 году кафедру возглавил **Андрей Федорович Александров**. (30.05.1935).

Окончил физический факультет МГУ (кафедру физической электроники, 1959). Руководитель аспирантуры – Н.А. Капцов. Первые научные исследования были посвящены исследованию взаимодействия квазистационарного электрического поля с плоским слоем плазмы. Внес существенный вклад в разработку физических основ взаимодействия низкочастотных электромагнитных полей с пространственно ограниченной плазмой. Кандидат физико-математических наук (1965).



## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

В дальнейшем его научные интересы сосредоточились на исследовании физики плотной излучающей плазмы и разработки на ее основе мощных оптических источников накачки для лазеров. На созданном под руководством А.Ф. Александрова уникальном экспериментальном стенде "Фотон" изучен большой класс излучающих разрядов.



В результате были созданы источники излучения с рекордными параметрами, которые нашли практическое применение для создания особо мощных лазерных систем для специальных приложений, в том числе в программе лазерного управляемого термоядерного синтеза, в фотохимии и других областях. В 1975 году он защитил докторскую диссертацию "Физические процессы в сильноточных электроразрядных источниках света". За этот цикл работ в составе коллектива авторов (А.И. Захаров, Ф.А. Николаев, Б.Л. Борович, А.Ф. Александров, Н.Н. Петров, В.Б. Розанов, А.А. Рухадзе, Н.Н. Козлов, Ю.С. Протасов, И.В. Подмошенский, Ю.П. Петров, Э.А. Азизов) в 1981 г. ему была присуждена Государственная премия.

С 1977 года под руководством Андрея Федоровича начинает развиваться новое направление – создание мощных генераторов СВЧ излучения на основе релятивистских электронных пучков. На сильноточном ускорителе электронного пучка на кафедре были впервые выявлены физические процессы, ограничивающие длительность генерации в таких устройствах и обоснован переход к пространственно развитым электродинамическим системам. В итоге были впервые реализованы различные типы релятивистских СВЧ-генераторов. За эти работы А.Ф. Александрову совместно с А.А. Рухадзе и В.И. Канавцом была присуждена Ломоносовская премия МГУ I степени. В 2010 г. за цикл статей "Электромагнитные свойства плазменных волноводов и резонаторов с учетом временной и пространственной дисперсии" Андрей Федорович вместе с М.В. Кузелевым и А.А. Рухадзе удостоен премии МАИК "Наука/Интерпериодика" за лучшую публикацию.

Наконец еще одно из научных направлений, связанное с деятельностью Андрея Федоровича – это углеродная электроника. Он развивает работы в области физических основ технологии получения тонких пленок и пленочных структур для задач микро- и наноэлектроники, материаловедения и медицины. Созданы углеродные карбиноподобные покрытия для медицинских имплан-

тантов, обладающие уникальной биосовместимостью и тромборезистентностью, микропористые углеродные адсорбенты и др.

В Московском университете читал лекции по курсу общей физики для физиков, создал и читал спецкурсы: «Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой», «Основы электродинамики плазмы», «Динамика излучающей плазмы», «Физика сильноточных релятивистских электронных пучков», «Физическая электроника». В настоящее время читает курсы: «Введение в физическую электронику» и «Колебания и волны в плазменных средах» для студентов отделения радиофизики и электроники. Приглашенный профессор Юннанского университета (Китай, 1998).

Член Ученого Совета факультета (1985), председатель диссертационных Советов при МГУ (1990 - 2000, 2001). Заслуженный профессор Московского университета (2001). Лауреат Ломоносовской премии I степени (1989) и Ломоносовской премии за педагогическую деятельность (1997). Академик РАЕН (1993). Член Научных советов РАН «Физика плазмы» (1978), «Физика низкотемпературной плазмы» (1980), «Мощная импульсная энергетика» (1985), «Физическая электроника» (1986). Член секции «Физика плазмы» НТС Минвуза СССР (1979), координационного совета по межвузовской НТП «Ионно-плазменная технология» НТС Минвуза СССР (1980). Член Научного совета государственной НТП «Новые технологии и устройства микро- и наноэлектроники» Миннауки РФ (1991), Экспертного совета ВАК СССР (1985). Член редколлегии журналов «Радиотехника и электроника» (1987), «Вестник Московского университета. Сер. Физика. Астрономия» (1990), «Прикладная физика» (1994), «Учебный эксперимент в высшей школе» (2002), «Полупроводниковые и газоразрядные приборы» (2003).

Лауреат Государственных премий СССР (1981, 1991). Заслуженный деятель науки РФ (1995). Награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» I степени (2005), почетными знаками «Отличник народного просвещения» (1971), «Отличник просвещения СССР» (1973), «За успехи в НИРС» (1974).

Подготовил 26 кандидатов и шесть докторов наук. Опубликовал более 250 научных работ, 10 монографий, учебников и учебных пособий. Основные труды: «Физика сильноточных электроразрядных источников света» (совместно с А.А. Рухадзе, М.: Атомиздат, 1976, 184 с.); «Основы электродинамики плазмы» (совместно с Л.С. Богданкевич и А.А. Рухадзе, М.: Высшая школа, 1978, 407 с.); «Лекции по электродинамике плазмоподобных сред» (совместно с А.А. Рухадзе, М.: Физ. ф-т МГУ, 1999, 450 с.); «New medical material based on metastable form of carbon» (with M.B. Guseva, V.G. Babaev, Yu.P. Kudryavtsev, and V.V. Khvostov, *Diamond and Related Materials*, 1995, 4, 1142-1144); «Физика электронных пучков и основы высокочастотной электроники» (учебное пособие, совместно с М.В. Кузелевым, М.: КЛУ, 2007, 300 с.).

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

С начала 2016 года обязанности заведующего кафедрой исполняет **Владимир Савельевич Черныш** (16.09.1945). Окончил физический факультет МГУ (1969). Кафедра электроники рекомендовала его в аспирантуру, а военная кафедра – на службу в армии. В результате В.С Черныш был распределен на работу в НИИ полупроводникового приборостроения. В 1970 году был призван как офицер запаса для прохождения службы в Войсках ПВО на западных рубежах под Калининградом. В 1972 году поступил в аспирантуру, после окончания которой с 1975 года работает на кафедре. В течение многих лет (1976–1979 гг., 1981–1990 гг.) избирался партгором кафедры. Был членом



парткома физического факультета последнего созыва.

Первые научные исследования В.С. Черныша были посвящены изучению явлений распыления и вторичной ионной эмиссии, возникающих при бомбардировке твердых тел ионными пучками. В его работах была впервые обнаружена аномалия выхода распыленных атомов и ионов вблизи точек магнитного и полиморфного превращений. В исследованиях распыления сплавов впервые был обнаружен эффект нестехиометрического распыления компонентов по углам выхода и детально изучено влияние параметров как материала мишени,

так и ионного облучения на формирование потока распыленных атомов. Под его руководством была разработана уникальная методика изучения вторичной ионной эмиссии с угловым и энергетическим разрешением. Результаты этих исследований не только способствовали развитию представлений о механизмах эмиссии атомов и ионов, но имели также большое значение для совершенствования современных методов диагностики и модификации поверхности ионными пучками.

Кандидатскую диссертацию защитил в 1976 году, а докторскую – в 1989 году. В 1979 – 80 гг. проходил научную стажировку в Копенгагенском и Орхусском университетах (Дания), в 1980–81 гг. работал в Дании в качестве приглашенного ученого. По его инициативе в 1985 г. был заключен Договор о международном научном сотрудничестве между МГУ и Копенгагенским университетом.



В 2000 и 2003 гг. работал по приглашению в Корейском институте науки и технологий (Сеул, Южная Корея).

В 2006 году по его инициативе в отделе физики атомного ядра НИИ ЯФ МГУ была создана лаборатория ионно-пучковых нанотехнологий, а в 2007 году была создана совместная лаборатория ионно-пучковых нанотехнологий физического факультета МГУ, НИИЯФ МГУ и ОАО «Тензор».

В конце 2010 года в лаборатории был реализован проект по созданию ускорителя газовых кластерных ионов. Уже в первых экспериментах был обнаружен новый механизма распыления кластерными ионами.

В кратчайшие сроки лаборатории удалось завоевать ведущие позиции в нашей стране в этой области.

В Московском университете читает курсы: «Взаимодействие атомных частиц с веществом», «Ионная спектроскопия поверхности», «Взаимодействие ионов низких энергий с поверхностью твердых тел».

Младший научный сотрудник (1975), старший научный сотрудник (1985), ведущий научный сотрудник (1991), заместитель заведующего кафедрой по научной работе (1987–1996), главный научный сотрудник физического факультета МГУ (2015). Член Ученого Совета физического факультета (1986–1998, с 2006 г. по наст. время), двух диссертационных советов при МГУ (2001). Ученый секретарь комиссии «Взаимодействие плазмы с веществом» Секции физики плазмы НТС Минвуза СССР (1976–1990). Член Оргкомитетов Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами и Международной конференции по взаимодействию ионов с поверхностью.

По его инициативе кафедра электроники в 1990 году была переименована в кафедру физической электроники.

Подготовил десять кандидатов наук. Опубликовал более 170 научных работ. Основные труды: «Изменение распыления монокристалла Ni при переходе через точку Кюри» (совм. с В.Е. Юрасовой, М.В. Кувакиным и Л.Б. Шелякиным, Письма в ЖЭТФ, 1975, **2**,197); «The angular distribution of material sputtered from AgAu and CuPt by 20 - 80 keV argon» (совместно с Н.Н. Andersen и J. Chevallier, Nucl. Instr. and Methods, 1981, **191**, 253); «Эффект массы бомбардирующих ионов в распылении сплавов» (совм. с В.С. Тубольцевым и В.С. Куликаускасом, Письма в ЖЭТФ, 1996, **63**, 507); «Effects of substrate treatment on the initial growth mode of indium-tin-oxide films» (with Y. Han, D. Kim, et al, J. Appl. Phys., 2005, **97**, 024910-1); «The new mechanism of sputtering with cluster ion beams» (совместно с А.Е. Ieshkin, Yu.A. Ermakov, Appl. Surf. Sci., 2015, **326**, 285).

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ГАЗОВОГО РАЗРЯДА



Сотрудники лаборатории газовых разрядов кафедры электроники. 23.02.1980.

Первый ряд слева направо: И.Б. Тимофеев, Л.Ю. Филиппова, О.П. Коробова, В.Е. Мицук, В.С. Свиридкина, Г.В. Спивак, А.А. Кузовников, М.В. Маслова, С.А. Двинин, В.П. Савинов. Второй ряд: В.М. Шибков, С.Н. Окс, В.Д. Ермошин, И.А. Савченко, Л.М. Волкова, А.М. Девятков, Л.И. Цветкова, Г.С. Солнцев, Б.Н. Швилкин, П.С. Булкин. Третий ряд: А.С. Зарин, А.П. Ершов, В.Г. Якунин, Ю. Филиппов, М.И. Белавин, В.Л. Ковалевский, Н.Б. Петухов, Н.П. Попова, Ю.А. Русанов, Л.С. Жомин, А.В. Восканян

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Поскольку проведение экспериментов, находящихся на переднем крае науки, немислимо без параллельного проведения теоретических исследований, на кафедре электроники всегда проводились такие работы. Был теоретически определен первый таунсендовский коэффициент ионизации (С.К. Моралев, И.И. Глотов). Н.А. Капцов рассчитал распределения поля в коронирующем слое и вольтамперные характеристик короны, им рассмотрены прерывистые явления в коронном разряде и ее переход в искровой или дуговой разряд. Г.В. Спивак разработал новый метод интерпретации показаний зондов при наличии магнитного поля и создал фундаментальную теорию влияния магнитного поля на зондовые токи. Классическая теория Ленгмюра вытекает из этой общей теории как частный случай. Параллельно была уточнена теория процессов в магнетроне. Учет функции распределения электронов по скоростям, проводившийся Г.В.Спиваком в исследованиях магнетрона и влияния

магнитного поля на процессы в плазме и в вакууме, привел в 1948 г. к разработке общего метода нахождения функций распределения для неравновесных, но стационарных систем при наличии явлений переноса.

С 1957 по 1964 г. на кафедре работал Вениамин Львович Грановский, который вместе со своими аспирантами (И.А. Васильева, А.С. Сыргий, В.С. Голубев, Ю.М. Алесковский, Э.И. Уразаков) исследовал процессы аномальной диффузии в плазме, помещенной в магнитное поле. Монография В.Л. Грановского «Электрический ток в газе» (1952) приобрела большую популярность благодаря систематически и блестяще изложенному разностороннему экспериментальному и теоретическому материалу по элементарным и коллективным процессам в газовом разряде.

С 1966 по 2008 г. теоретические исследования на кафедре возглавлял профессор А.А. Рухадзе. С его приходом на кафедре опять появились молодые теоретики-дипломники, аспиранты, стажеры-исследователи, установились тесные контакты с теоретическими коллективами таких крупных академических институтов как ФИАН и ИОФАН, ИАЭ им. И.В. Курчатова. Кафедра стала серьезной школой по подготовке квалифицированных теоретиков в области физики плазмы и электродинамики материальных сред. Многие из них работают в различных научных центрах и высших учебных заведениях, как в нашей стране, так и за рубежом, руководя кафедрами теоретической физики, теоретическими секторами и лабораториями.

К числу наиболее ярких выпускников кафедры и стажеров-исследователей 60-х годов можно отнести докторов физ.-мат. наук Б.А. Альтеркопа (впоследствии профессора Тель-Авивского университета, Израиль), Б. Милича (впоследствии профессора университета в Белграде, Югославия), В.В. Северьянова (впоследствии зав. кафедрой общей и теоретической физики Тульского пединститута), С.А. Тригера (впоследствии зав. сектором теоретического отдела ИВТАН). Среди выпускников 70-х годов следует отметить Н.А. Мартинова (впоследствии заведующего кафедрой теоретической физики и проректора Софийского университета, Болгария), Абу-Асали Элиаса (впоследствии декана университета в Дамаске, Сирия), Д. Зюндера (впоследствии заведующего теоретической лабораторией Института Макса Планка в Берлине), Р.Д. Джамалова (впоследствии заведующего теоретическим отделом в Институте теплофизики



Вениамин Львович  
Грановский  
(14.08.1905–06.05.1964)



Анри Амвросьевич  
Рухадзе  
(09.07.1930)

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

в Ташкенте), И.В. Чашея (впоследствии заведующего теоретической лабораторией в Пушчинском филиале ФИАН), О.М. Градова (впоследствии ведущего научного сотрудника Института металлургии РАН).

В теоретической группе кафедры профессорами А.А. Рухадзе и М.В. Кузелевым была подготовлена целая плеяда прекрасных теоретиков, составивших основу кафедры общей и теоретической физики в Тульском пединституте: В.А. Панин (ныне ректор Тульского государственного педагогического университета им. Л.Н. Толстого (ТГПУ)), А.П. Плотников (ныне проректор и зав. кафедрой (ТГПУ)), Ю.В. Бобылев (ныне профессор кафедры (ТГПУ)), В.В. Романов (ныне руководитель вычислительного центра (ТГПУ)).

Проводимые на кафедре теоретические исследования всегда были тесно связаны с экспериментом и, в первую очередь, с экспериментальными работами самой кафедры. Уже в первых теоретических исследованиях 60-х и начала 70-х годов в работах А.А. Рухадзе, Б. Милича, Б.А. Альтеркопа, Абу-Асали Элиаса и других была развита линейная и нелинейная теория ионно-звуковой неустойчивости разряда в постоянном электрическом поле, что в значительной степени способствовало проведению целенаправленных экспериментов в группе А.А. Зайцева. Эти эксперименты количественно подтвердили порог возбуждения ионно-звуковых колебаний в слабоионизованной плазме с током, рассчитанный теоретически, а также нелинейную ее стадию, как суперпозицию основной нарастающей моды и ее нелинейной затухающей гармоники. Работы В.В. Северьянова и А.А. Рухадзе были нацелены на экспериментальные исследования профессора А.А. Кузовникова, в которых исследовались нелинейные резонансы при воздействии ВЧ излучения на плазму. Одним из основных результатов этих исследований было получение формулы для средней силы, действующей на плазму, обобщающей известное выражение для силы Миллера на область частот, в которой существенна пространственная дисперсия.

Теоретические работы А.А. Рухадзе и С.А. Тригера стимулировали развертывание большого цикла исследований на установке "Фотон". Более того, они легли в основу ряда исследований в этой области, проводимых в тесном контакте с кафедрой, также и в других научных коллективах (ФТИАН, МГТУ им. Н.Э.Баумана, Институте прикладной математики и др.). Общая совокупность этих исследований привела к развитию новой области науки – радиационной магнитной гидродинамики, теоретическому и экспериментальному обоснованию возможности создания эффективных источников света на основе сильнооточных излучающих разрядов, в которых процессы переноса определяются излучением. На основе этих исследований в 1978 году опубликована монография А.Ф. Александрова, А.А. Рухадзе "Физика сильнооточных электро-разрядных источников света" и в составе коллектива авторов А.Ф. Александрову и А.А. Рухадзе в 1981 году была присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники.

Большой вклад в современную плазменную электронику имеют также работы Э.В. Ростомяна, Б.А. Альтеркопа, В.В. Северьянова, исследовавших под руководством А.А. Рухадзе задачи инжекции релятивистских пучков в пространственно-ограниченную плазму с возбуждением электромагнитного излучения. Особо следует отметить работы А.А. Рухадзе и М.В. Кузелева по формулированию основных принципов релятивистской СВЧ электроники. В результате этих работ была создана новая область физики плазмы – релятивистская плазменная СВЧ электроника. Рассчитанные теоретиками и реализованные экспериментально в ИОФ РАН плазменные СВЧ генераторы успешно конкурируют с вакуумными и даже обладают рядом преимуществ. Теоретические исследования в этой области в 1990 году обобщены в монографии А.А. Рухадзе, М.В. Кузелева "Электродинамика плотных электронных пучков в плазме", переведенной на английский язык и изданной во Франции.



Свежую струю в классическую теорию газового разряда внесли работы, проводимые нашими теоретиками в содружестве с Дагестанским университетом. О.А. Омаровым (впоследствии профессор О.А. Омаров — ректор Дагестанского университета и заместитель В.А. Садовниченко в Совете ректоров вузов) были проведены экспериментальные исследования, количественно подтвердившие теорию, развитую в работах А.А. Рухадзе с учениками.

Особо следует отметить роль теоретической группы в совершенствовании преподавания на кафедре. Огромным авторитетом на кафедре и физическом факультете в целом пользовался годовой теоретический спецкурс по электродинамике плазмы, читавшийся профессором А.А. Рухадзе. На основе этого курса А.Ф. Александровым, Л.С. Богданкевич, А.А. Рухадзе создан учебник "Основы электродинамики плазмы", который в 1991 году был удостоен Государственной премии СССР в области науки и техники. Учебник был переведен в 1984 г. на английский язык, и издан в Германии издательством Шпрингер-Ферлаг (Springer-Verlag) и получил высокую оценку в СССР и за рубежом, превратившись в настольную книгу для физиков-плазменщиков.

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

Этот учебник, по существу, представляет собой изложение основ электродинамики сред с пространственной дисперсией и ее применению для описания электромагнитных свойств плазмы и плазмоподобных сред.



В настоящее время теоретические исследования в области электродинамики плазмы и плазменной СВЧ-электроники на кафедре физической электроники продолжаются и с немалым успехом. Работы ведутся под руководством профессора М.В. Кузелева и доцента И.Н. Карташова. Основные направления теоретических исследований: электродинамика сред с временной и пространственной дисперсией, теория электромагнитных волн в плазме и плазменных неустойчивостей, электродинамика плотных электронных пучков и вынужденное излучение электромагнитных волн в плазме, нелинейные электромагнитные явления в плазме и компьютерное моделирование, плазменная релятивистская СВЧ-электроника, электродинамика квантовой плазмы, разработка электротехнической теории высокочастотных разрядов индуктивного типа и комбинированных индуктивно-емкостных разрядов. За период с 2000 года опубликовано более 100 журнальных статей и ряд монографий, в числе которых М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, П.С. Стрелков «Плазменная релятивистская СВЧ – электроника», М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе «Методы теории волн в средах с дисперсией», Ю.В. Бобылев, М.В. Кузелев «Нелинейные явления при

электромагнитных взаимодействиях электронных пучков с плазмой». Теоретические исследования проводятся в контакте с экспериментаторами кафедры (группа д.ф.-м.н. Е.А. Кралькиной) и с научными коллективами академических институтов, главным образом Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН – теоретическим отделом (ныне возглавляет выпускник кафедры, профессор Н.Г. Гусейн-заде) и лабораторией плазменной электроники (профессор П.С. Стрелков).

Помимо группы А.А. Рухадзе теоретические работы выполнялись и в отдельных экспериментальных группах. Например, в группе взаимодействия ионов с поверхностью работы по теории распыления велись М.В. Кувакиным, начаты исследования электронного обмена на поверхности твердых тел И.Ф. Уразгильдиным. В группе Г.С. Солнцева впервые было предложено использовать глобальные модели для описания СВЧ разряда в волноводе (В.А. Довженко). Функция распределения электронов по энергиям в разряде рассчитывалась В.А. Довженко и А.П. Ершовым. В продолжение этих работ была построена теория ионизационно полевой неустойчивости газового разряда (линейные и нелинейные модели, С.А. Двинин, В.А. Довженко) построена одномерная модель волны ионизации в СВЧ поле, пригодная для плотностей электронов ниже и выше критической. Предложен механизм формирования нитевидных структур в СВЧ разряде низкого давления за счет электростатического усиления СВЧ поля на торцах разряда, рассмотрено распространение поверхностных волн в трехслойной структуре плазма-слой пространственного заряда-металл, что важно для описания работы высокочастотных емкостных реакторов низкого давления.

В.М. Шибков рассчитывал функцию распределения азота по колебательным уровням, временную эволюцию различных химических компонент плазмы при инициации горения горючей смеси газовым разрядом.

В последние годы в связи с дальнейшим развитием электроники появились новые направления, связанные с исследованием структуры различных соединений углерода (Ю.В. Коробова, И.П. Иваненко, В.В. Хвостов). С 2016 года по предложению В.С. Черныша на кафедре был организован «ТЕОРОТДЕЛ» под руководством М.В. Кузелева и организована работа семинара отдела для координации теоретических исследований на кафедре.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЩНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

Интенсивное развитие радиолокации вызвало необходимость исследовать взаимодействие радиоволн метрового и сантиметрового диапазонов с ионизованным газом, а также условия возникновения и свойства электрических разрядов, возбуждаемых ВЧ и СВЧ полями. Первые экспериментальные исследования ВЧ разряда при низких давлениях (1–6 МГц), проведенные Х.А. Джерпетовым, П.С. Булкиным и др. методом зондов позволили определить пространственное распределение температуры и концентрации электронов. С помощью электронного пучка были измерены постоянные и ВЧ поля в ВЧ

разряде. Развитие ВЧ разрядов низкого давления в воздухе и аргоне при различных перенапряжениях на электродах изучались сопоставлением осциллограмм тока и интенсивности излучения плазмы (Г.Н. Застенкер, Г.С. Солнцев, Б.Н. Швилкин). В 60-х годах в рамках работы "Комета", выполнявшейся большим коллективом сотрудников и аспирантов под руководством профессора Н.А. Капцова (Г.С. Солнцев, В.Е. Мицук, П.С. Булкин, М.З. Хохлов, Г.Н. Застенкер и др.) проведены исследования возникновения импульсного СВЧ разряда в воздухе. Современная для того времени комплексная методика измерений пробойной мощности и статистического времени запаздывания позволила объяснить влияние радиоактивного облучения разрядного объема и влажности воздуха на условия образования плазмы под действием СВЧ поля сантиметрового диапазона. Было установлено, что статистическое время запаздывания пробоя значительно возрастает, когда парциальное давление паров воды сравнимо с парциальным давлением кислорода или выше его. Эти результаты имели практическое значение для обеспечения устойчивой радиосвязи самолетов между собой и Землей в условиях полета в атмосфере и явились основой для дальнейших исследований, описанных ниже.

### ЛАЗЕРНАЯ ИСКРА

В начале шестидесятых годов на кафедре электроники под руководством доцента В.Е. Мицука были проведены пионерские исследования нового уникального газового разряда, создаваемого в сфокусированном пучке электромагнитного излучения оптического диапазона. Такой тип разряда называли «лазерной искрой». В экспериментах использовались оптические генераторы (лазеры) с мощностью излучения до 30 МВт.

Исследовались пробойные характеристики такого разряда в зависимости от размера области фокусировки лазерного луча, типа и давления газа, его состава (инертные газы и их смеси с ртутью [В.Е. Мицук, В.А. Черников. Письма в ЖЭТФ, 1967, **6**, с. 627]). Были определены пробойные характеристики в случае реализации комбинированного разряда: лазерное плюс СВЧ излучения [А.П. Дарманян, В.Е. Мицук, В.А. Черников. Письма в ЖЭТФ, 1968, **8**, с. 117]. Это позволило выявить механизм взаимодействия мощного электромагнитного излучения с газообразными средами. Работы были выполнены на высоком научном уровне и соответствовали лучшим мировым стандартам.



В.Е. Мицук

На основании полученных результатов были подготовлены и успешно защищены три диссертации на соискания ученой степени кандидата физико-математических наук (В.А. Черников, Р.М. Саввина, Э. Гернитц). Издано учебное пособие В.Е. Мицук "Введение в физику излучения плазмы" (Изд. МГУ, 1984).



## ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И КИНЕТИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

С начала пятидесятых годов на кафедре физической электроники под руководством доцента А.М. Девятова при активном участии Л.М. Волковой начались исследования в области исследования элементарных процессов, кинетики низкотемпературной плазмы газового разряда.

В период с 1950 по 1960 гг. впервые в нашей стране (одновременно с Ленинградским университетом) была поставлена серия экспериментальных работ по определению функций возбуждения спектральных линий инертных газов и щелочных элементов с помощью моноэнергетических пучков электронов (А.М. Девятов, Л.М. Волкова, Син Сан Гук).

В начале 60-х годов были изучены механизмы ионизации и возбуждения атомов в положительном столбе разряда низкого давления в парах щелочных металлов: Na, K, Rb, Cs. Были оценены эффективные сечения ионизации и возбуждения перечисленных атомов электронным ударом из основных и возбужденных состояний (прямые и ступенчатые процессы). Многие из этих данных были получены впервые в мире и некоторые из них до сих пор остаются уникальными. (Л.М. Волкова, А.М. Девятов, Т.Н. Соловьев).

В 1970 – 77 годы были разработаны методы определения параметров плазмы по измеренным интенсивностям линейчатого и сплошного спектров излучения, а также по зондовым ВАХ с помощью метода регуляризации А.Н. Тихонова. Применение метода регуляризации позволило определить функцию распределения электронов по энергиям в ранее недоступной для традиционных методов области энергий, а именно в области энергий, превышающих потенциал ионизации атомов. Были изучены энергетические распределения быстрых электронов в положительном столбе и отрицательном свечении разряда постоянного тока, а также исследованы распределения атомов примеси в разряде гелия с натрием (А.М. Девятов, С.Ф. Шушурин, Л.М. Волкова, Е.А. Кралькина, А.В. Куралова, М.А.Х. Шериф, А.С. Меченов).

В те же годы были исследованы механизмы ионизации и возбуждения атомов щелочноземельных элементов в разряде в полой катод. Впервые был предложен и применен способ определения концентрации атомов по изме-



А.М. Девятов



Л.М. Волкова

ренным параметрам контуров самообращенных спектральных линий. Результаты этого цикла измерений были использованы для оценки усредненных по функции распределения электронов по энергиям значений эффективных сечений прямого и ступенчатого возбуждения электронным ударом спектральных линий магния, кальция, стронция и бария (Л.М. Волкова, А.М. Девятов, Ф.Х. Кидрасов, В.Х. Фазлаев).

С середины 70-х годов под руководством А.М. Девятова начались интенсивные исследования в области физики неравновесной плазмы в смеси газов, закономерностей разделения компонентов смеси в продольном и радиальном направлениях (явления катафореза). Изучены зависимости степени радиального разделения компонент смеси от парциальных давлений буферного и примесного газов, разрядного тока и индукции продольного магнитного поля (Девятов А.М., Шибков В.М., Шайхитдинов Р.З.). С использованием импульсной модуляции разрядного тока были исследованы законы релаксации параметров плазмы и обнаружено явление уменьшения эффективной диффузионной длины разряда для атомов примеси. Исследована кинетика заселения метастабильных состояний атомов буферного и примесных газов. Установлено, что в начальной стадии импульсного разряда при определенных условиях возможно осуществление режима убегания электронов, что приводит к инверсной заселенности возбужденных состояний. Изучение свойств нестационарной плазмы импульсного разряда в молекулярных и атомарных газах позволило получить ряд констант скоростей элементарных процессов и коэффициентов переноса: эффективный коэффициент рекомбинации в воздухе; коэффициенты диффузии метастабильных атомов в бинарных смесях инертных газов и их температурные зависимости; зависимости коэффициентов диффузии метастабильных атомов от процентного содержания компонентов смеси; коэффициенты пеннинговской ионизации при взаимодействии двух метастабильных атомов гелия и метастабильных атомов гелия с атомами ксенона в основном состоянии; сечение ступенчатого возбуждения метастабильных атомов ксенона электронным ударом (А.М. Девятов, Л.М. Волкова, В.М. Шибков, Л.В. Шибкова, Ф.А. Аушева).

В начале и середине 80-х годов были проведены исследования поведения характеристик неизотермической плазмы в инертных газах, помещенной в продольное магнитное поле. В результате исследований были предложены новые методы обработки ВАХ тока на зонд с учетом эффекта стока электронов на зонд, влияния ионизации газа в призондовом слое и анизотропии функции распределения электронов по скоростям для получения информации о свойствах плазмы в магнитном поле. Был разработан метод полной автоматизированной обработки на ЭВМ вольтамперной характеристики тока на зонд, в том числе и измеренных в магнитоактивной плазме (А.М. Девятов, Л.М. Волкова, М.А. Мальков, В.С. Николаев, А.В. Куралова).

В конце 80-х начале 90-х годов изучались характеристики разрядов в бинарных смесях, одной из компонент которых является электроотрицательный

газ: He-II, He-I. Присутствие электроотрицательной примеси и отрицательных ионов в объеме ионизованного газа почти всегда вызывает возникновение стоячих и бегущих страт в положительном столбе разряда. Характеристики и механизмы перераспределения компонент смесей газов в стратифицированном положительном столбе на нашей кафедре изучались впервые. Обнаружено, что радиальное перераспределение частиц – компонент смесей в разных участках страт отличается качественно, количественно и по механизмам перераспределения (А.М. Девятов, Л.М. Волкова, Ли Сын Чан, М.К. Таракджи, А.В. Калинин, С.Р. Мийович).

В течение 1997–1999 гг. на кафедре физической электроники под руководством профессора В.М. Шибкова в рамках первого на физическом факультете МГУ имени М.В.Ломоносова международного проекта, финансируемого по соглашению между факультетом и Международным Научно-Техническим Центром, был выполнен цикл исследований по проекту «Разработка новых плазменных технологий тонкой очистки инертных газов». Получен патент на способ и устройство для очистки газов, преимущественно инертных, от примесей [В.М. Шибков, Л.В. Шибкова, В.А. Черников, Л.М. Виноградский, С.В. Григорович, С.К. Соболев Патент РФ №2175271, заявка №99116168, приоритет от 23.07.99 г.]. Изучены механизмы, приводящие к пространственному разделению компонентов смеси. Впервые предложен и апробирован способ управления с помощью продольного магнитного поля степенью радиального разделения компонентов бинарных и тройных смесей в плазме стационарного и импульсного разрядов.

Предложен новый механизм магнитомеханического эффекта в запыленной плазме. Показано, что притяжение одноименно заряженных макрочастиц в пылевой плазме может быть вызвано взаимодействием магнитных полей, возникающих вследствие дрейфа ионов зарядового слоя вокруг пылинок под действием электрического поля.

Результаты исследований составляют основу кафедральных спецкурсов и учебных пособий А.М. Девятова "Упругое рассеяние электронов на возбужденных атомах" (Изд. МГУ, 1991 г.), А.М. Девятова и В.М. Шибкова "Элементарные процессы и физика низкотемпературной плазмы" (Изд. МГУ, 1992 г.), М.А. Малькова, А.М. Девятова, А.А. Кузовникова и А.П. Ершова "Зондовая диагностика плазмы газоразрядных источников света" (Изд. Мордовского университета, 1991г.), Л.В. Шибковой, В.М. Шибкова «Разряд в смесях инертных газов» (М.: Физматлит, 2005).

В лаборатории были подготовлены и успешно защищены одна докторская (Р.З. Шайхитдинов) и четырнадцать кандидатских диссертаций.

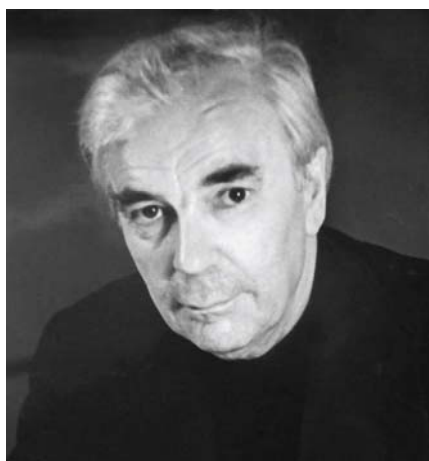


## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

ций (Л.М. Волкова, Т.Н. Соловьев, М.А. Шериф, Ф.Х. Кидрасов, В. Фазлаев, Е.А. Кралькина, Л.В. Шибкова, Ли Сын Чан, М.К. Таракджи, В.С. Николаев, М.А. Мальков, Р.З. Шайхитдинов, Ф.А. Аушева, А.В. Калинин), а также около 50 дипломных работ.

### СВОБОДНО ЛОКАЛИЗОВАННЫЙ СВЧ-РАЗРЯД В ВОЗДУХЕ

С начала 70-х годов под руководством профессора А.А Кузовникова и доцента В.Е. Мицука на кафедре электроники начало развиваться новое направление в физике плазмы, связанное с изучением безэлектродного СВЧ-разряда, создаваемого сфокусированным пучком мощного электромагнитного излучения. По заданию директивных органов на кафедре был создан уникальный лабораторный стенд, оснащенный современным диагностирующим оборудованием. В работе принимали участие: В.М. Шибков, ставший впоследствии профессором, доценты А.М. Девятов, Г.С. Солнцев, П.С. Булкин, В.А. Черников, ведущий инженер В.В. Злобин, А.В. Восканян, соискатель А.С. Зарин, аспиранты В.Н. Куликов, Ю.А. Русанов, А.Н. Магунов, В.В. Лодинев, а также инженерно-технический состав кафедры и студенты.



Анатолий Александрович  
Кузовников  
(09.11.1922 – 17.11.2004)



В.М. Шибков и группа экспериментаторов  
(Д.Н. Ваулин, В.А. Черников, В.В.Злобин) рядом  
с экспериментальным стендом

Впервые был предложен и экспериментально апробирован режим программированного воздействия. С его помощью была решена проблема локализации СВЧ-разряда в заданном месте свободного пространства. Решены задачи управления основными параметрами плазмы и свойствами свободно локализованного СВЧ разряда в воздухе [Шибков В.М., Кузовников А.А. Шибкова Л.В. Теплофизика высоких температур, 1996, **34**, № 3, с. 349 – 354. № 4, с. 525 – 530, № 5, с. 741–745, Александров А.Ф., Кузовников А.А., Шибков В.М. Инженерно-физический журнал, 1992, **62**, №5, с.726]. Был экспериментально обнаружен и подробно исследован «аномально» быстрый нагрев воздуха в плазме самостоятельного СВЧ-разряда, предложен механизм, объясняющий это явление [Шибков В.М. Теплофизика высоких температур, 1997, **35**, № 5, с. 693–701; Шибков В.М. Теплофизика высоких температур, 1997, **35**, № 6, с. 871–875].

По результатам исследований была подготовлена и издана монография: А.С. Зарин, А.А. Кузовников, В.М. Шибков. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ. 1996. На основе полученных результатов были подготовлены и успешно защищены одна докторская (В.М. Шибков), пять кандидатских диссертаций (А.С. Зарин, В.Н. Куликов, В.В. Лодинев, Ю.А. Русанов, А.Н. Магунов) и 10 дипломных работ.



## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН С НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ

С конца 80-х годов под руководством профессора А.А. Кузовникова проводились работы по выявлению механизмов, влияющих на распространение ударных волн в плазме. В работе принимали участие профессор А.П. Ершов и В.М. Шибков, аспиранты и студенты кафедры. Выполнено комплексное, систематическое исследование взаимодействия УВ с тлеющим разрядом в воздухе и атомарных газах. На основе сопоставления результатов экспериментов с данными математического моделирования распространения плоской УВ по идеальному газу было показано, что ускорение УВ в исследованном диапазоне целиком может быть объяснено в рамках задачи о взаимодействии УВ с тепловой неоднородностью [Войнович П.А., Ершов А.П., Пономарева С.Е., Шибков В.М. Теплофизика высоких температур, 1991, **29**, № 3, с. 582 – 590]. Экспериментально установлено, что структура электронной компоненты УВ



Алексей Петрович Ершов  
(08.07.1950–10.06.2009)

в плазме поперечного емкостного ВЧ разряда в атомарных и молекулярных газах характеризуется наличием теплопроводностного предвестника в виде волны разрежения, обусловленного выносом зоны охлаждения электронов за фронтом УВ.

На основе полученных результатов были подготовлены и успешно защищены одна кандидатская диссертация (С.Е. Пономарева), и 3 дипломных работы.

### **ПЛАЗМЕННАЯ АЭРОДИНАМИКА И ГОРЕНИЕ, СТИМУЛИРОВАННОЕ ПЛАЗМОЙ**

В начале 90-х годов 20 века было обнаружено, что освоение сверхзвуковых и гиперзвуковых областей скоростей полета летательных аппаратов (ЛА) требует разработки принципиально новых методов управления газовыми потоками, основанных на использовании различных газовых разрядов, плазменных струй и электронных пучков, равновесной и неравновесной плазмы в рамках создающегося нового научного направления «плазменной аэродинамики и горения стимулированного плазмой» (ПА и ГСП).

К сожалению, с 1992 года государственное финансирование данных исследований прекратилось. Однако благодаря появлению в 1993 году соглашения Гор-Черномырдин, которым разрешалось проведение совместных российско-американских научных исследований, группе исследователей (1993 г. – Г.А. Мишин, 1995 г. – А.И. Климов и В.Л. Бычков) удалось заинтересовать данной проблемой американских ученых, которые постарались создать новое для них направление при помощи финансирования известных групп из бывшего СССР. На кафедре физической электроники данные исследования проходили под руководством А.Ф. Александрова. Он добился разрешения проведения



Руководитель исследований по плазменной аэродинамике и горению, стимулированной плазмой, профессор А.Ф. Александров



Группа основных исследователей по плазменной аэродинамике и горению, стимулированному плазмой (2005). Слева направо: профессор А.П. Ершов, профессор В.М. Шибков, доцент В.А. Черников, доктор ф.-м. наук, академик РАН В.Л. Бычков

исследований с американскими заказчиками через Международный научно-исследовательский центр (МНТЦ) и постоянно направлял и стимулировал исследования.

На кафедре данным направлением занимались группа профессоров А.П. Ершова и В.М. Шибкова, группа профессора И.Б. Тимофеева и доцента В.А. Черникова. Последняя в своих исследованиях опиралась на теоретические разработки докторов В.Л. Бычкова и Н.В. Арделяна (факультет ВМК). Они изучали возможность применения тлеющих и СВЧ разрядов, плазменных струй (в том числе магнитоплазменных и эрозионных-капиллярных), для воздействия на ударные волны, для создания долгоживущих светящихся плазменных образований с целью энергетического воздействия на газы, металлические и диэлектрические объекты.

Благодаря совместным работам с американскими учеными, исследователи из упомянутых выше научных групп участвовали в важнейших международных конференциях по данному направлению исследований – Workshop on Weakly Ionized plasma, и AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit проводимых American Institute of Aeronautics and astronautics в период с 1997 по 2014 г.

На кафедре предложен, реализован и подробно исследован СВЧ разряд, создаваемый поверхностной волной на диэлектрической антенне, обтекаемой сверхзвуковым потоком воздуха. [Шибков В.М., Ершов А.П., Черников В.А.,

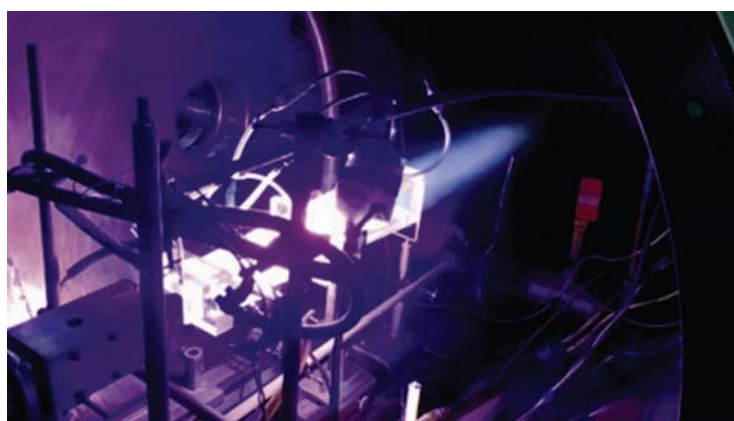
## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

Шибкова Л.В. ЖТФ, 2005, **75**, № 4, с. 67–73. Шибков В.М., Двинин С.А., Ершов А.П., Шибкова Л.В. ЖТФ, 2005, **75**, № 4, с. 74–79].



Группа российских и американских исследователей после окончания семинара (2010), МГУ, Москва

Впервые решены задачи, применения самостоятельного СВЧ-разряда для быстрого воспламенения и стабилизации сверхзвукового горения воздушно-углеводородных топлив. [Шибков В.М., Александров А.Ф., Ершов А.П., Тимофеев И.Б., Черников В.А., Шибкова Л.В. Физика плазмы, 2005, **31**, с. 857–864; Константиновский Р.С., Шибков В.М., Шибкова Л.В. Кинетика и катализ, 2005, **46**, №6, с. 821 – 834. Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Chernikov V.A., Ershov A.P., Shibkova L.V. Journal of Propulsion and Power, 2009, **25**, No 1, p. 123 – 137].



Стабильное плазменно-стимулированное горение в канале, моделирующем камеру сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя

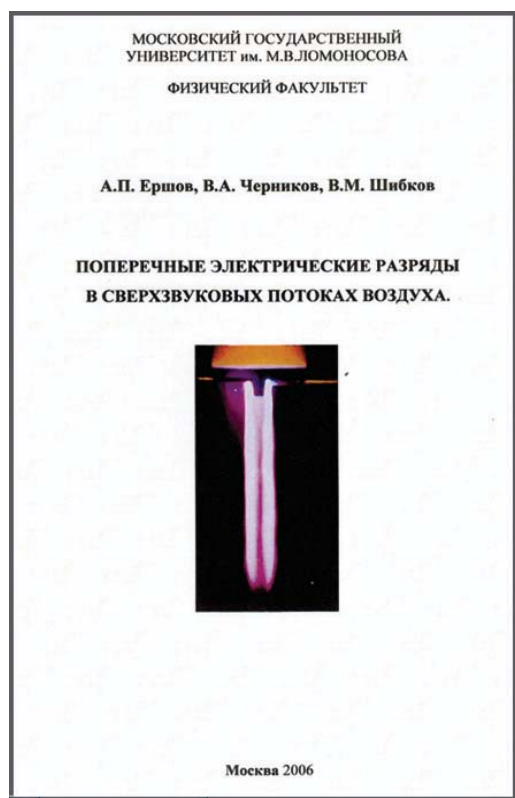




Профессор В.М. Шибков и доцент В.А. Черников вместе с сотрудниками, аспирантами и студентами у лабораторного стенда, на котором проводятся исследования в области сверхзвуковой плазменной аэродинамики

Реализована стабилизация горения пропана в сверхзвуковом потоке воздуха внутри гладкого (без использования застойных зон) аэродинамического канала с присоединенным воздухопроводом. Апробирована методика определения концентрации заряженных частиц в быстрых потоках плазмы с помощью электрического зонда в гидродинамическом режиме. Были проведены эксперименты по определению начальных условий, при которых реализуется стабильное горение топливной смеси в сверхзвуковом потоке, инициированное продольно-поперечным разрядом постоянного тока. [Ершов А.П., Каменщиков С.А., Логунов А.А., Черников В.А. ТВТ, **47**, №5, с. 643 – 649, 2009]. Детально исследована инициация горения воздушно-пропановой смеси в высокоскоростном потоке при помощи импульсного магнитоплазменного компрессора [Ершов А.П., Каменщиков С.А., Логунов А.А., Черников В.А. ТВТ, **47**, № 6, с. 822 – 829, 2009.]

Результаты выполненных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод перспективности разрабатываемой плазменной технологии для инициирования воспламенения и поддержания стационарного горения сверхзвуковых потоков воздушно-углеводородных топлив.



По результатам исследований была подготовлена и издана монография: А.П. Ершов, В.А. Черников, В.М. Шибков. Поперечные электрические разряды в сверхзвуковых потоках воздуха. М.: Физический факультет МГУ. 2006.

На основе полученных результатов были подготовлены и успешно защищены две докторские (А.П. Ершов, Л.В. Шибкова) и семь кандидатских диссертаций (Е.Б. Колесников, Б.И. Тимофеев, С.А. Каменщиков, Р.С. Константиновский, А.А. Фирсов, Д.Н. Ваулин, П.В. Копыл). Группами И.Б. Тимофеева и доцента В.А. Черникова совместно с теоретической группы докторов В.Л. Бычкова и Н.В. Арделяна (с ВМК) разработаны методы воздействия плазменных струй на динамику потоков газов; методы стимулирования горения углеводородных топлив

при помощи плазменных струй; методы электронно-пучкового возбуждения углеводородных пламен и ускорение их горения. Исследованы процессы плазменного воспламенения паров на поверхности углеводородных топлив. Показана возможность воздействия филаментарной плазмы на ударные волны и звуковой удар.

Исследования по этим темам вошли в монографические обзоры: Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Kosmachevsky K.V. Electron-beam and non-selfmaintained driven plasma for PAC. In Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. Vol.1. Ed. I.B. Matveev. Outskirts press. Denver, Colorado. 2013. P. 183-372; Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Kosmachevsky K.V. Numerical modeling of hot jets utilized by DC plasma generators for PAC. In Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. Vol.2. Ed. I.B. Matveev. Outskirts press. Denver, Colorado. 2015. P. 90-139.

## ИОННО-ПУЧКОВЫЕ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Группа по изучению физики высокочастотного разряда и разработке плазменных и ионно-пучковых технологий на его основе является сравнительно молодой. Она сложилась в девяностые годы прошлого века и проводимые экспериментальные и теоретические работы являются развитием направлений, традиционно разрабатываемых на кафедре физической электроники. Это прежде всего работы группы профессора А.А. Кузовникова по взаимодействию полей с ограниченной плазмой (см. ниже), теоретические работы, выполненные профессорами А.Ф. Александровым и А.А. Рухадзе, методы зондовой и

оптической диагностики плазмы, разработанные в группе А.М. Девятова и Л.М. Волковой.

Основными направлениями работы группы – исследования ВЧ разряда при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля, разработка макетов источников плазмы на его основе, разработка ионно-пучковых и плазменных технологий модификации поверхности материалов и нанесения функциональных покрытий.

Экспериментальные работы, ведущиеся в группе, осуществляются на современных установках, закупленных в рамках программы развития МГУ. Большую роль в получении этого оборудования сыграл А.Ф. Александров.

Базовая вакуумная установка для легирования тонких пленок, имплантации ионов и создания наноструктурированных металлических покрытий



Установка для исследования ВЧ разряда

В группе разработана теоретическая модель индуктивного ВЧ источника плазмы без магнитного поля, проведено его численное моделирование, систематические экспериментальные исследования его параметров [К.В. Вавилин, Е.А. Кралькина, А.А. Рухадзе. Краткие сообщения по физике, 2004, N8, с. 44, Александров А.Ф., Бугров Г.Э., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Павлов В.Б., Плаксин В.Ю., Рухадзе А.А. Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2005, 6, No 1, с. 5]. Исследования показали, что эффективность поглощения ВЧ мощности (эквивалентное сопротивление плазмы) немонотонно зависит от плотности плазмы в силу конкуренции двух факторов: увеличения поглощения ВЧ мощности и

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

уменьшения глубины проникновения поля в плазму (определяемое размером скин-слоя) с ростом плотности электронов.

Исследована роль различных механизмов диссипации поля при изменении давления нейтрального газа [К.В. Вавилин, А.А. Рухадзе, М.Х. Ри, В.Ю. Плаксин. Журнал технической физики, 2004, **74**, вып. 5, с. 44; 2004, **74**, вып. 6, с. 25]. При давлениях менее 1 мТор преобладает черенковский механизм диссипации. Рост частоты электрон-атомных столкновений  $\nu$  (при  $\nu < \omega$ ), увеличивает роль столкновительного поглощения и значениях  $\nu$  лежащих в диапазоне  $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ , столкновения электронов однозначно определяют эквивалентное сопротивление плазмы, которое при фиксированной плотности электронов не зависит от рода газа. При частотах столкновений более  $1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$  эквивалентное сопротивление определяется емкостной составляющей разряда, влияние которой зависит от рода газа [Е.А. Крапкина, А.А. Рухадзе, В.В. Павлов, К.В. Вавилин, Р.А. Неклюдова, А.К. Петров and А.Ф. Александров, Plasma Sources Science and Technology, 2015, **25**, 015016].

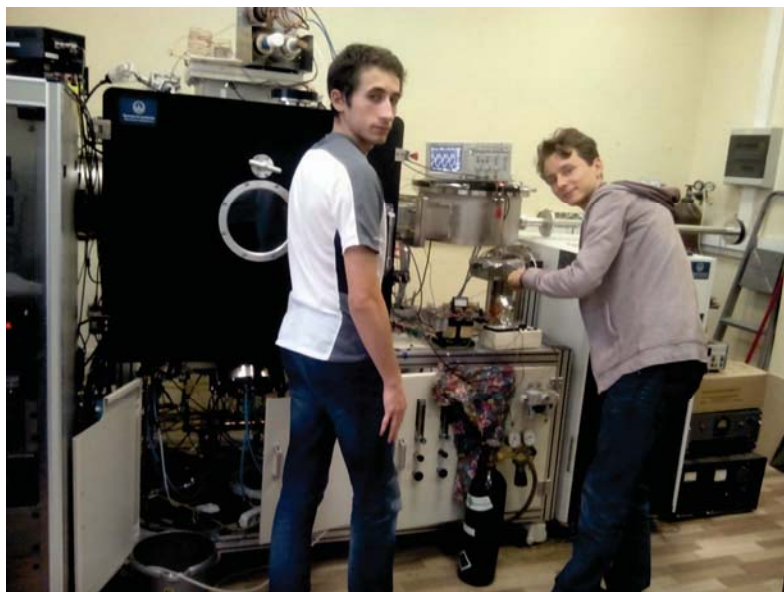


Обсуждение результатов измерений. Слева – направо: студент 3 курса А. Косарев, студентка 2 года магистратуры И. Зотева, в.н.с. Е.А. Крапкина, м.н.с. П.А. Неклюдова, аспирант А. Никонов

Емкостной канал разряда, связанный с паразитной емкостью между витками индуктора и плазмой, приводит к немонотонной зависимости концентрации и эффективной температуры электронов в области скин-слоя от давления при постоянной мощности ВЧ генератора. Концентрация электронов максимальна, а эффективная температура электронов минимальна в диапазоне давлений 0.01 – 0.1 Тор. Максимум плотности электронов наблюдается при равенстве частоты столкновений  $\nu$  электронов и частоты поля  $\omega$ .

В области больших давлений происходят самосогласованное уменьшение концентрации электронов, рост активного сопротивления плазмы, увеличение емкостной составляющей разряда и потока энергии, выносимой ионами на стенки. Экспериментально зарегистрировано и подтверждено в численном моделировании взаимное влияние двух каналов разряда, осуществляемое через импедансы, вносимые плазмой и слоями пространственного заряда [А.Ф. Александров, К.В. Вавилин, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, А.А. Рухадзе. Физика плазмы, 2007, **33**, с. 802 – 815; 2007, **37**, с. 816 – 827].

Аспирант И.И. Задириев и студент 2-го года магистратуры Г. Швыдкий измеряют параметры перспективной модели электрореактивного двигателя



М.н.с. П. Неклюдова измеряет параметры гибридного высокочастотного разряда совместно со студентами 3 курса

Исследованы характеристики гибридного разряда в котором организовано два параллельных канала ввода ВЧ мощности – индуктивный и емкостной, причем соотношение между каналами регулируется с помощью разделительной емкости, включенной в емкостную ветвь разряда. Показано, что изменение величины разделительной емкости позволяет плавно управлять плотностью

плазмы и потенциалом активного электрода [К.В. Вавилин, М.А. Гоморев, Е.А. Кралькина, П.А. Неклюдова, В.Б. Павлов, Ч. Чжао. Вестник Московского университета, сер. 3, Физика, Астрономия, 2012, №1, С. 97–100; Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б. Прикладная физика, 2013, № 5, с. 34–37; 2014, № 1, с. 9 – 11].

Проведены численное моделирование, экспериментальные исследования и построена теоретическая модель индуктивного ВЧ разряда в магнитном поле [А.Ф. Александров, Г.Э. Бугров, К.В. Вавилин И.К. Керимова, С.Г. Кондранин, Е.А. Кралькина, В.Б. Павлов, В.Ю. Плаксин, А.А. Рухадзе. Физика плазмы, 2004, **30**, №5, с. 434]. Исследования показали, что разряд поддерживается геликоноподобной и квазипродольной кривой ленгмюровскими волнами. Область существования объемных волн сужается при уменьшении длины источника плазмы и с ростом давления рабочего газа.

В тех случаях, когда разряд поддерживается объемными волнами, зависимость эффективности поглощения ВЧ мощности плазмой (эквивалентного сопротивления плазмы) от величины магнитного поля немонотонна. Локальные максимумы эквивалентного сопротивления соответствуют областям резонансного возбуждения геликоноподобной и квазипродольной кривой ленгмюровской волн [А.Ф. Александров, Н.Ф. Воробьев, Е.А. Кралькина, В.А. Обухов, А.А. Рухадзе. ЖТФ, 1998, **64**, N11, с. 53–58, К.В. Вавилин, А.А. Рухадзе, М.Х. Ри, В.Ю. Плаксин. ЖТФ, 2004, **74**, вып. 6, с. 29].

Результаты исследований обобщены в обзорной работе Е.А. Кралькиной «Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе» [УФН, 2008, **178**, №5, с. 519].

Передача ВЧ мощности в плазму при давлениях менее  $10 \text{ мТор}$  определяется главным образом поглощением квазипродольной волны, доминирующим механизмом диссипации будет бесстолкновительное черенковское поглощение. Рост частоты столкновений приводит к сглаживанию зависимости эквивалентного сопротивления от величины магнитного поля и понижению абсолютных значений эквивалентного сопротивления. Показано, что с ростом частоты столкновений амплитуда квазипродольной кривой ленгмюровской волны понижается, и ее ВЧ поля перестают проникать в объем плазмы, в то время как амплитуда и проникновение геликона в плазму не изменяются.

Экспериментальные исследования и численные расчеты, выполненные на основании разработанных теоретических моделей разряда, показали, что при условиях, когда эквивалентное сопротивление плазмы меньше или порядка эффективного сопротивления антенны, происходит самосогласованное перераспределение мощности между плазмой и активным сопротивлением внешней цепи, которое проявляется:

- в существовании двух мод индуктивного ВЧ разряда с сильно различающейся плотностью плазмы;
- в появлении гистерезиса параметров плазмы при переходе разряда из моды с низкой плотностью плазмы в моду с высокой плотностью и обратно;

- в появлении гистерезиса параметров плазмы при увеличении и уменьшении внешнего магнитного поля;
- в насыщении зависимости концентрации плазмы от мощности ВЧ генератора в области высоких концентраций электронов;
- в ограничении при наличии внешнего магнитного поля области существования разряда со стороны больших магнитных полей;
- немонотонной зависимости плотности плазмы от внешнего магнитного поля.

Экспериментальные исследования, выполненные в двухкамерном технологическом ВЧ источнике плазмы, показали, что при превышении порогового значения индукции внешнего магнитного поля, уменьшающегося с ростом рабочей частоты, и использовании металлического разделительного фланца в источнике плазмы возбуждается частично стоячая волна. Профиль амплитуды и фазы ВЧ волны указывает на наличие отраженной волны от нижнего фланца и области неоднородности концентрации электронов в области сочленения газоразрядной и технологической камер. В случае использования однородного магнитного поля при давлениях, когда длина свободного пробега электронов превышает геометрические размеры источника плазмы, увеличение индукции магнитного поля позволяет повысить концентрацию электронов в технологической камере, причем на рабочих частотах 4 и 13.56 МГц она становится выше, чем в газоразрядной камере [А. Петров, К. Вавилин, Г. Козлов, Е. Кралькина, П. Неклюдова, А. Никонов, В. Павлов. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 2015, 6].

Эффект аксиального перераспределения плотности плазмы с ростом индукции магнитного поля вызван самосогласованным действием следующих факторов:

- изменением аксиального распределения ВЧ полей, связанного с возбуждением волн в плазме,
- изменением величин квазистационарных скачков потенциала в разряде вблизи металлических элементов конструкции источника плазмы,
- действием силы Миллера, выталкивающей электроны и ионы из областей с высоким градиентом ВЧ полей.

Наибольшие значения плотности плазмы в технологической камере получены при рабочей частоте 4 МГц.

Показано, что при давлениях выше 10 мТор лучше использовать индуктивный разряд без магнитного поля, в котором превалирует столкновительный механизм поглощения ВЧ мощности. Понижение давления и роли столкновительных механизмов поглощения ВЧ мощности приводят к необходимости усиления бесстолкновительного поглощения ВЧ мощности, что в области низких концентраций электронов возможно при условии ЭЦР, а в области более высоких концентраций – при возбуждении объемных геликоноподобной и квазипродольной кривой ленгмюровской волн. В области низких давлений ВЧ мощность лучше вкладывается в источники большого радиуса. Повысить эф-

фективность ввода ВЧ мощности в источники малого радиуса возможно при увеличении длины источника или при увеличении рабочей частоты.

В последние годы в группе начато изучение емкостного ВЧ разряда, помещенного во внешнее магнитное поле с преимущественной радиальной компонентой. Геометрия источника плазмы близка к геометрии ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. Достоинством устройства, работающего на емкостном ВЧ разряде, является отсутствие катода, снижающего ресурс устройства. К настоящему времени показано, что в области локализации радиального магнитного поля также как и в ускорителе возникает азимутальный дрейф электронов, который приводит к значительному росту концентрации электронов. На выходе из разряда зафиксирован ускоренный пучок ионов, который может быть использован для обеспечения тяги в космических приложениях.

Разработаны прототипы источников плазмы для космических и наземных технологий, – технологическая гибридная система для нанесения сложных функциональных покрытий и протяженный атмосферный ВЧ разряд для чистки и поверхностной модификации материалов.

Разработаны ионно-пучковая и плазменные технологии поверхностной модификации полиимида и фторопласта, позволяющие существенно увеличить их адгезионные свойства.

Разработана плазменная технология нанесения гидрофильных покрытий на поверхность материалов, применение которой улучшает энергетическую эффективность теплообменников кондиционеров не менее, чем на 25%.

За годы существования группы подготовлено 7 диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (К.В. Вавилин, В.Б. Павлов, Ч. Чжао, П.А. Неклюдова, А.П. Петров и И.И. Задириев) и 1 диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (Е.А. Кралькина).

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОВОЛН С ПЛАЗМОЙ И СВЧ РАЗРЯДЫ**

Помимо отмеченных выше исследований, СВЧ разряды исследовались в группе под руководством Г.С. Солнцева ( П.С. Булкин, Л.И. Цветкова, В.Н. Пономарев, Н.Ц. Герасимов, В.А. Довженко, П.П. Мельниченко, А.И. Орлов, С.А. Двинин и др.). Рассматривался СВЧ разряд в трех качественно различных электродинамических системах:

- индуктивный плазменный стержень в волноводе (реализуется в трубке, расположенной перпендикулярно широкой стенке волновода);
- резонансный разряд (трубка параллельна широкой стенке волновода);
- разряд, поддерживаемый распространяющейся вдоль него волной в трех электродинамических системах – трубка в прямоугольном или цилиндрическом волноводе, разряд в щели в стенке волновода и разряд, поддерживаемый поверхностной волной (surfaguide).



А.И. Орлов изучал воздействие СВЧ поля на отрицательное свечение тлеющего разряда, что позволяло управлять кинетическими процессами в плазме и получить дополнительные данные об элементарных процессах в разряде.

В группе была впервые теоретически разработана и экспериментально проверена самосогласованная глобальная модель разряда, позволяющая на основе совместного решения уравнений баланса числа электронов и их энергии с уравнениями поля Максвелла рассчитать его характеристики.

Специфической особенностью СВЧ разрядов в волноводе является высокая концентрация электронов, превышающая критическую концентрацию. Измерена энергия, теряемая в среднем одним электроном за единицу времени вследствие различных процессов, величина которой определяет энергетический баланс в плазме. При давлениях выше 1 Торр обнаружено хорошее совпадение расчетов по теоретической модели с экспериментом (Г.С. Солнцев, В.А. Довженко).

Исследования импульсных разрядов показали, что формирование плазмы с высокой концентрацией электронов сопровождается изменением мод, отвечающих за распространение СВЧ волны вдоль плазменного столба. При низких плотностях электронов это обычная слабозамушенная плазмой сверхвысокочастотная волна, а при плотностях много больше критической – поверхностная. В области вблизи критической плотности волна сильно поглощается плазмой, а дисперсия будет аномальной.

Обнаруженные формы разряда получили название нормального и аномального [Булкин П.С., Пономарев В.Н., Солнцев Г.С. Журнал технической физики, 1963, **33**, с. 1222–1226. Пономарев В.Н., Солнцев Г.С. Ibid, 1966, **36**, с.1376–1382], что получило признание в научной литературе. В разрядах, поддерживаемых поверхностной волной, получены данные о тепловых процессах, приводящих к продольной неоднородности плотности газа, чего не учитывают современные теории этих разрядов. Важным каналом нагрева газа является ускорение ионов полями амбиполярной диффузии и пристеночного слоя (Ершов А.П., Рахман М. и др.).

Установлено, что вследствие возникновения неустойчивостей в СВЧ разрядах внутри волновода образуется слоистая структура плазменного столба (С.А. Двинин, В.А. Довженко и др.). Впервые построены линейная и нелинейная теории образования слоистой структуры вследствие ионизационной неустойчивости для закритической плазмы. Выделены резонансный и нерезонанс-



Г.С. Солнцев

Установлено, что вследствие возникновения неустойчивостей в СВЧ разрядах внутри волновода образуется слоистая структура плазменного столба (С.А. Двинин, В.А. Довженко и др.). Впервые построены линейная и нелинейная теории образования слоистой структуры вследствие ионизационной неустойчивости для закритической плазмы. Выделены резонансный и нерезонанс-

ный режимы неустойчивости. Сформулирован путь построения моделей разряда основанный на использовании метода Галеркина, что дало возможность объяснить появление гистерезиса характеристик разряда при низком давлении.



В.А. Довженко

Проведено сравнение результатов теории с экспериментом [Двинин С.А., Довженко В.А., Солнцев Г.С. Физика плазмы, 1982, **8**, с. 1228–1235, 1983, **9**, с. 1058–1067, Двинин С.А., Постников С.А., Солнцев Г.С., Цветкова Л.И. Физика плазмы, 1983, **9**, с. 1297–1302]. С.А. Двининым и В.А. Довженко построена одномерная модель волны ионизации в СВЧ поле, пригодная для плотностей электронов ниже и выше критической [Двинин С.А., Довженко В.А. Физика плазмы, 1988, **14**, с. 66–76]. В работе Булкина П.С., Двинина С.А., Солнцева Г.С. [Вестник Моск. Ун-та. Сер. III, Физика, Астрономия, 1982, **23**, №6, с. 84–87] экспериментально исследовано поглощение СВЧ поля в плазменном столбе, связанное с усилением поля в точке плазменного резонанса.

Предложен механизм формирования нитевидных структур в СВЧ разряде низкого давления за счет электростатического усиления СВЧ поля на торцах разряда [Двинин С.А. Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика, Астрономия. 1985, **26**, №6, с. 30–33, Гильденбург В.Б., Гушин И.С., Двинин С.А., Ким А.В. ЖЭТФ, **96**, 1990, с. 1151–1158]. Построен аналог уравнения плазмы и слоя Ленгмюра и Тонкса, дополнительно учитывающий перезарядку [Двинин С.А., Довженко В.А., Кузовников А.А. Физика плазмы, 1999, **25**, с. 882–892] и многомерная аналитическая модель положительного столба с учетом инерции ионов [Двинин С.А., Берлин Е.В., Михеев В.В., Свиридкина В.С., Омаров М.О. Физика плазмы, 2004, **30**, с. 1043–1051]. Полученные результаты важны для расчета пространственных распределений плотности плазмы в разрядных камерах большого размера. В последние годы было показано, что в трехслойной структуре плазма, слой пространственного заряда, металл возможно распространение поверхностных волн [Двинин С.А., Вологиров А.Г., Михеев В.В., Свиридкина В.С. Физика плазмы, 2008, **34**, с. 746–755, 2008, **34**, с. 756–766]. Именно эти волны обеспечивают корректное функционирование технологических высокочастотных емкостных реакторов низкого давления.

Построение модели разряда, учитывающего распространение этих волн, было предметом договора с фирмой SEMES (Чеонан, Южная Корея).

С 2011 года начались совместные исследования с Таджикским Национальным университетом. Благодаря сотрудничеству с бывшим аспирантом ФИАН, учеником Л.М. Горбунова Д.К. Солиховым в группе появилась новая научная тематика – исследование параметрических неустойчивостей в ограниченной плазме (Солихов Д.К., Овчинников К.Н., Двинин С.А. Вестник Моск. Ун-та. Сер. III, Физика, Астрономия, 2012, **53**, №1, с. 69–72, Солихов Д.К., Двинин С.А. Физика плазмы, 2016, **42**, с. 590–605). В соответствии с догово-

## ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК – 2016

ром о содружестве между МГУ и ТНУ сотрудники кафедры читают лекции для студентов ТНУ, посвященные актуальным вопросам современной физики.



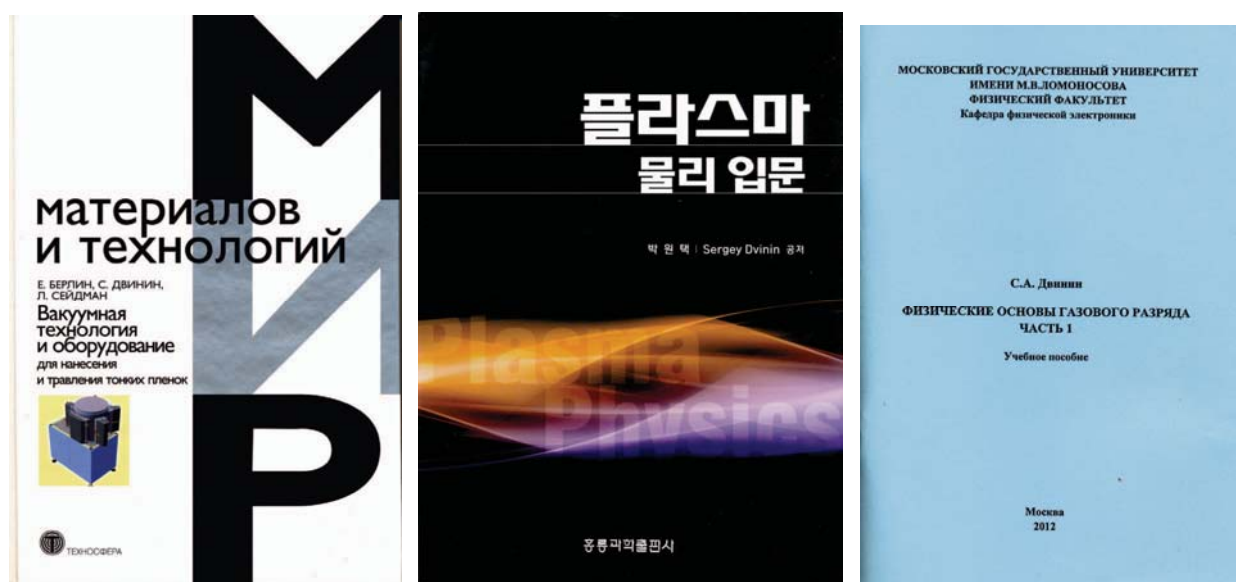
С.А. Двинин, В.В. Михеев, В.С. Свиридкина, М.О. Омаров



С.А. Двинин и Н.С. Ерохин (ИКИ) с руководством физического факультета  
Таджикского национального университета

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

По результатам работ с 1974 г. защищены шесть кандидатских (А.И. Орлов, 1971, Н.Ц. Герасимов, 1972, В.А. Довженко (1974), П.П. Мельниченко (1982), С.А. Двинин (1983), М. Рахман (1986)) и две докторских диссертации (С.А. Двинин, 2010, Д.К. Солихов, 2016). Написаны книга: Берлин Е.В., Двинин С.А., Сейдман Л.А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. М.: Техносфера. 2007. 172 с., и учебные пособия для студентов: А.П. Ершов, Г.С. Солнцев "Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой и СВЧ разряды" (Изд. МГУ, 1990); Park W.T., Dvinin S.A. 플라스마 물리 입문 (Введение в физику плазмы) на корейском языке (Science Publishers Hongreung Южная Корея, ISBN 978-89-97570-14-0, 210 с.); Двинин С.А. Физические основы газового разряда, Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова Москва, 2012, 119 с.



### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОСТРАНСТВЕННО ОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

Одним из направлений исследований, проводимых в группе А.А. Кузовникова (А.Ф. Александров, А.А. Кузовников, К.С. Головановский, Н.А. Николов, В.В. Северьянов, В.А. Годяк, В.П. Савинов, Эль Саммани, С.Н. Окс, В.В. Тарасова, В.С. Свиридкина и др.) было изучение процессов на границе плазмы. Как обнаружилось в процессе исследований, при взаимодействии ВЧ полей с ограниченной плазмой наблюдается целый ряд эффектов, определяющих как процесс ее создания, так и процесс воздействия на стенку. Без изучения этих эффектов невозможно было конструирование ВЧ ионных источников, технологических плазменных реакторов для нужд нано и микроэлектроники, а также плазменных двигателей на ВЧ разряде.

А.Ф. Александров экспериментально обнаружил, что в области частот поля, много меньших электронной ленгмюровской, активная проводимость плазменного конденсатора оказывается много меньше, чем в элементарной

теории, не учитывающей теплового движения электронов (А.Ф. Александров, А.А. Кузовников). Последовательный учет эффектов пространственной дисперсии, наличия широкого спектра собственных типов колебаний в плазме и их возбуждения под действием внешнего высокочастотного электрического поля показали, что в области низких частот, сравнимых или меньших ионной ленгмюровской поляризация ограниченной плазмы носит ионный характер и в ней происходит резонансное возбуждение стоячих ионнозвуковых волн – низкочастотного аналога резонансов Тонкса–Даттнера. Слои пространственного заряда, формирующиеся на границе плазмы и ограничивающих плазму поверхностей, в области низких частот полностью определяют реактивную часть импеданса, которая может быть использована для их исследования. Эти результаты затем были обобщены на случай нелинейных резонансов и резонансов в магнитоактивной плазме (Н.А. Николов). Особенности нелинейных явлений в пространственно ограниченной плазме, обусловленных сильной неоднородностью электрических полей, возбуждаемых в ней под действием внешнего квазистационарного электрического поля, теоретически исследованы В.В. Северьяновым. Им проанализированы средние силы, возникающие из-за неоднородности ВЧ поля вблизи границ плазмы вследствие экранировки и в объеме плазмы при возбуждении стоячих ионно-звуковых волн. Экспериментально такие усредненные силы исследованы в работах К.С. Голованивского путем измерения токов на пристеночный зонд.

Исследование разрядов емкостного типа (по существовавшей в то время классификации), возбуждаемых квазистационарными ВЧ полями в цилиндрических или квазиплоских разрядных промежутках, показало, что в них в одних случаях регистрируется протекание статических токов (I–режим), в других – возникновение между электродами постоянного напряжения (V – режим), причем по величине это напряжение достигает амплитудного значения приложенного ВЧ поля (А.А. Кузовников, А.Эль Саммани, А.Ф. Александров, В.П. Савинов, В.А. Годяк [Годяк В.А., Кузовников А.А., Савинов В.П., Эль Саммани А.Я. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 1968, №2, с. 126–130]). Была выдвинута, а затем – экспериментально и теоретически обоснована гипотеза о детектировании ВЧ напряжения на нелинейной вольт-амперной характеристике пристеночных или приэлектродных слоев пространственного заряда. Явление детектирования было промоделировано и подробно изучено с помощью плоского ВЧ зонда. Результаты исследования легли в основу нового метода диагностики параметров плазмы. Детальному изучению была подвергнута ФРЭЭ в ВЧ разряде (В.А. Годяк, С.Н. Окс).

Построена и экспериментально проверена модель емкостного разряда, показавшая существенную роль геометрического резонанса плазма-слой пространственного заряда при низких давлениях нейтрального газа.

Впервые в мире обнаружен эффект поглощения ВЧ поля в емкостном разряде при столкновениях электронов с осциллирующей стенкой потенциальной ямы, формируемой слоями пространственного заряда [Годяк В.А., Кузовников

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

А.А. Физика плазмы. 1975. 1. С. 496 – 503. Годяк В.А. Физика плазмы. 1976. 2. С. 141–151].

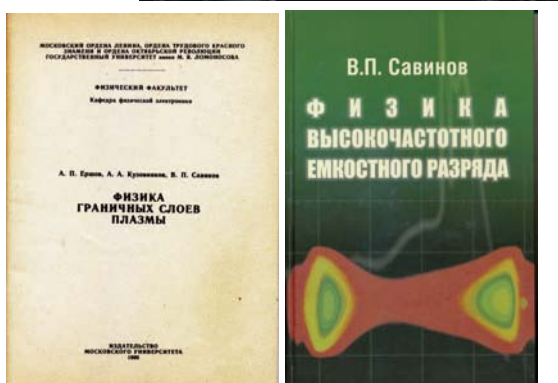
Построена модель ВЧ разряда, учитывающая конечность плотности электронов на границе плазмы и слоя (В.А. Годяк, В.Н. Максимов, 1977). Теоретически рассматривалась задача сопряжения уравнений плазмы и слоя в точке их границы, что вылилось в длинную плодотворную дискуссию с участием ведущих мировых специалистов в данной области (R. Franklin, V. Godyak, K.V. Riemann, R.-P. Brinkmann и др).

Полученные результаты были неоценимы для использования в будущих технологических устройствах. Впоследствии за исследования в области ВЧ разряда (к сожалению, вне Московского университета, в фирме Sylvania) В.А. Годяк в 2004 году был награжден медалью Максвелла Американского физического общества (2004 James Clerk Maxwell Prize for Plasma Physics Recipient, "For fundamental contributions to the physics of low temperature plasmas, including radio frequency wave heating, sheath physics, potential profiles, diagnostic probes, and the industrial applications of plasmas").

Была обнаружена резкая анизотропия функции распределения, обусловленная, главным образом, наличием группы быстрых электронов, возникающей из-за ускорения вторичноэмиссионных электронов в постоянном поле пристеночного (приэлектродного) слоя пространственного разряда (ППЗ). [Кузовников А.А., Савинов В.П. Радиотехника и электроника, 18, № 4, с. 816–822, Кузовников А.А., Ковалевский В.Л., Савинов В.П. Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 1983, 24, № 4, с. 28 – 32].



В.П. Савинов и В.Л. Ковалевский



По результатам исследований были написаны учебные пособия А.П. Ершов, А.А. Кузовников, В.П. Савинов «Физика граничных слоев плазмы» М.: МГУ, 1990, и монография В.П. Савинов, Физика высокочастотного разряда, Физматлит, 2013. На кафедре дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования разряда как в индуктивной, так и в емкостной формах, с учетом волновых свойств ВЧ полей для плазмы в магнитном поле и плазмы большого размера продолжают сейчас в группе Е.А. Кралькиной и С.А. Двининым.

## СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ РАЗРЯДЫ («ФОТОН»)

В 1967 г. по инициативе А.А. Рухадзе и А.Ф. Александрова (по идее Н.Г. Басова) были начаты работы в области экспериментального и теоретического изучения физических процессов в сильноточных излучающих разрядах. С практической точки зрения эти исследования были нацелены на создание особо высокоинтенсивных источников некогерентного излучения видимого и



Игорь Борисович Тимофеев  
(02.01.1942 – 21.03.2005)

ближнего УФ диапазонов длин волн для накачки сверхмощных лазеров. Рабочим телом таких источников должна была служить плотная излучающая плазма с плотностью электронов порядка  $10^{17} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , температурой  $2 \cdot 10^4 \dots 10^5 \text{ К}$  и временем жизни (временем устойчивого состояния) порядка 100 мкс. Состояние плазмы с такими параметрами предполагалось реализовать в сильноточных самосжатых разрядах (пинчах) в атмосфере тяжелых газов. В течение двух лет силами сотрудников, аспирантов и студентов кафедры был создан экспериментальный стенд "Фотон", – емкостной накопитель энергии с параметрами: общая емкость 500 мкФ, рабочее напряжение 50 кВ, запасная энергия – до 600 кДж, оснащенный средствами разрешенной во времени диагностики основных макроскопических параметров разряда.

Это был крупнейший из действовавших в то время в СССР экспериментальных стендов подобного типа. Большую роль в исследовании этого типа разряда сыграли эксперименты И.Б. Тимофеева.

Были исследованы два больших класса излучающих разрядов: "вакуумные" разряды, образованные металлическим взрывом в вакууме металлических проволок (И.Б. Тимофеев, В.В. Зосимов, В.В. Перебейнос, А.Т. Савичев, Э. Армия) и "атмосферные" разряды или разряды в неограниченной газовой среде (В.В. Зосимов, И.Б. Тимофеев, А.Т. Савичев).

В последнем случае для инициирования пробоя протяженных газовых промежутков, и, частично, для создания необходимого массового состава плазменного образования так же использовался электрический взрыв провод-

ников. Путем электрического взрыва проволочек из тяжелых металлов (серебро, вольфрам) была реализована стадия магнитного удержания плазменного шнура. Было показано, что изменяя начальные условия можно реализовать оптически непрозрачный либо полупрозрачный разряды. В обоих случаях коэффициент преобразования введенной в разряд энергии в излучение доходил до 30%, причем этот коэффициент преобразования для заданного спектрального интервала у полупрозрачного разряда оказывался существенно выше в устойчивом режиме, до развития силовых неустойчивостей типа перетяжек и винтов.

При исследовании протяженных (до 1 м) сильноточных разрядов в атмосфере, получаемых взрывом металлических проволочек, обнаружен разряд в форме тепловой волны. Была изучена динамика этого разряда, определены скорости расширения плазменного канала и создаваемой им ударной волны. Характерное значение этих скоростей  $(3...5) \cdot 10^3$  м/с что совпадало с расчетами по автомодельной теории атмосферных разрядов. При высоком значении скорости ввода энергии в канал обнаружена возможность магнитного удержания плазменного канала, после чего происходит отрыв ударной волны, а сам разряд приобретает характер квазивакуумного. Подробно была изучена структура атмосферных разрядов с помощью комбинации оптических методов – метода Бертельса для полупрозрачного разряда (Галузо С.Ю., Савичев А.Т., Канавец И.А.), метода плазменной индуктивности (А.Т. Савичев, Б.А. Пункевич), метода миниатюрных магнитных зондов и метода дифракции лазерного излучения и лазерного рассеяния (Савичев А.Т., Карпов О.В., Петров Г.Д.).

Исследовалось формирование коаксиальных (трубчатых) плазменных оболочек в системах типа обратного пинча при одновременном взрыве параллельно расположенных по окружности электродов проволочек (Перебейнос В.В.) и цилиндрической фольги. Питание каждой из проволочек по отдельной цепи питания дало возможность исключить развитие "макроскопической" перегретой неустойчивости, возникающей из-за статистического разброса в паузе тока для отдельных проводников. При этом формируется сплошная токовая оболочка, параметры которой для стадии магнитного удержания хорошо описываются теорией обратного пинча в оптически непрозрачной плазме, причем оболочка не проявляет признаков развития силовых неустойчивостей (Перебейнос В.В.). При взрыве многих проволочек в воздухе при атмосферном давлении наблюдается так называемый "эффект неслияния" отдельных токовых каналов, которые живут автономно в течение всей активной фазы разряда. Формирование сплошных плазменных оболочек достигается только в случае, если отдельные токовые каналы соприкасаются в той фазе, когда не произошло формирования и отрыва ударной волны.

Разряды с испаряющейся стенкой, прижатые давлением собственного магнитного поля к поверхности диэлектрика (Н-прижатые разряды), у которых форма излучающей поверхности могла изменяться от цилиндрической до плоской, а размеры определялись практически только энергоемкостью внешней



цепи (Э. Армия, В.Л. Лакутин), обладали высокой устойчивостью. Все описанные типы разряда отличались высокой яркостной температурой, а их излучение в области прозрачности кварца было близко к равновесному. Характерное значение яркостной температуры для сильноточных излучающих пинч-разрядов достигало 5...6 эВ, в атмосферных разрядах и разрядах с испаряющейся стенкой было порядка 2...3 эВ.

Для создания импульсных источников ультрафиолета для импульсного фотолиза и накачки лазеров на органических красителях были исследованы особенности динамики и излучение кумулирующих на стенку пинчей в инертных газах при средних давлениях (Суров О.И., Артамонов В.И., Юсупалиев У.). В этом типе разрядов разряде обнаружен эффект возбуждения обратных токов и развитие индукционной неустойчивости, приводящей к выбросу рабочего вещества из плазменной оболочки непосредственно после начала процесса сжатия. На основе кумулирующего пинча был создан источник излучения с яркостной температурой 1...1,5 эВ, длительностью импульса порядка нескольких микросекунд с фронтами порядка 0,2 мкс, который был успешно применен для накачки лазера на родамине 6Ж повышенной мощности (1 МВт).



Первые эксперименты по сильноточным излучающим разрядам. За пультом установки «Фотон» – лауреат Госпремии СССР профессор А.Ф. Александров

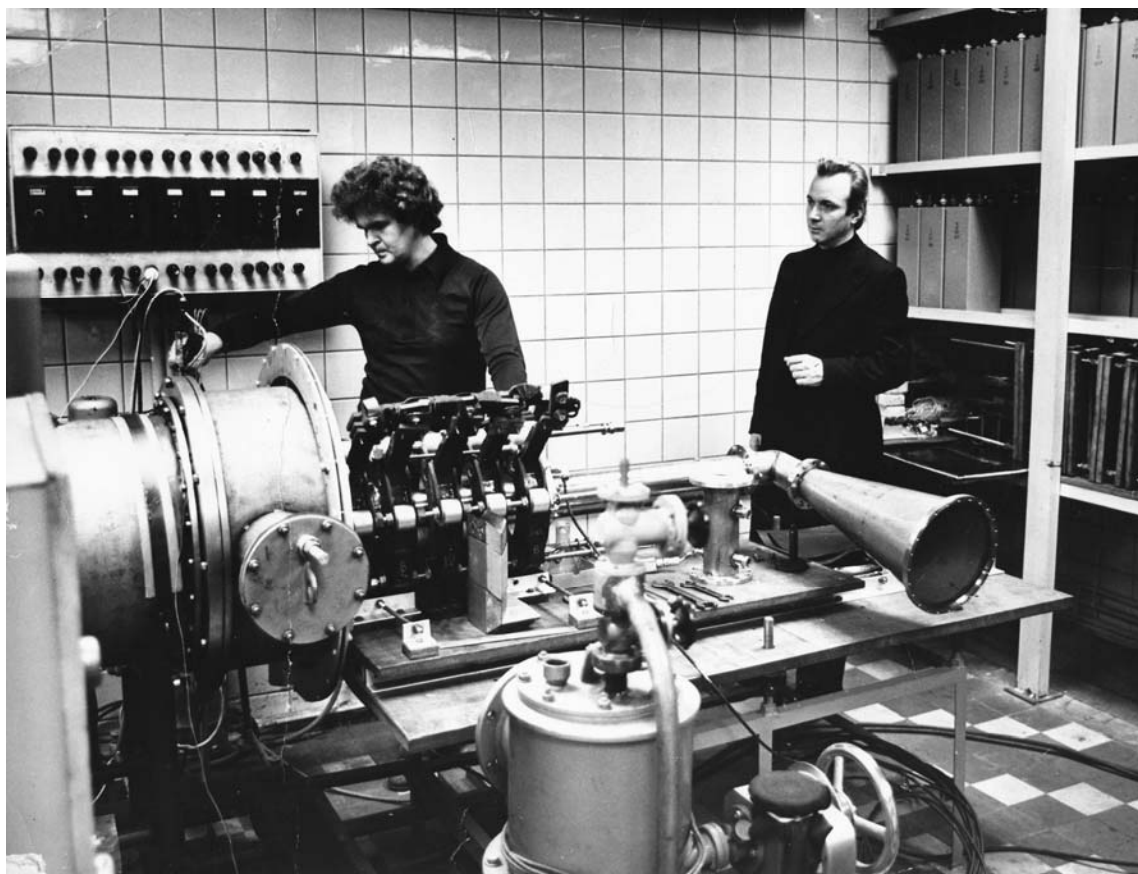
Результаты исследований по рассмотренному направлению легли в основу монографий А.Ф. Александрова и А.А. Рухадзе "Физика сильноточных электроразрядных источников света" (Атомиздат, 1976 г.), и учебного пособия А.Ф. Александрова, А.А. Рухадзе, И.Б. Тимофеева "Динамика излучающей плазмы" (Изд. МГУ, 1990 г.).

## **ФИЗИКА СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА**

Исследования в области релятивистской СВЧ электроники начались на кафедре также по инициативе А.А. Рухадзе и А.Ф. Александрова. Использование исключительных возможностей сильноточных электронных ускорителей

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

(СЭУ) по мощности и энергии пучка, с одной стороны, позволяет выйти на уровень выходной СВЧ мощности  $\sim 10$  ГВт и энергии одиночного импульса  $\sim 10$  кДж. С другой стороны, разработка приборов, в которых используется механизм рассеяния волн с повышением частоты пропорционально квадрату релятивистского фактора ускоренных электронов (лазеров на свободных электронах), дает возможность по новому подойти к проблеме освоения коротковолновой части диапазона СВЧ вплоть до оптических частот. Развитие этого направления стало возможным с запуском в 1978 году на кафедре сильноточного импульсного электронного ускорителя (СЭУ) прямого действия "Тандем-1" (Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Плетюшкин В.А.). Этот ускоритель представлял собой уникальный инструмент для экспериментальных исследований, позволяющий в широких пределах изменять характеристики электронного пучка: диапазон энергий электронов 200 кэВ – 1.2 МэВ, ток пучка 1 – 20 кА, длительность импульса от 200 нс до нескольких микросекунд.



На ускорителе (1978 г.). С.Ю. Галузо и А.Ф. Александров

В экспериментах 1978–1980 гг. (Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Плетюшкин В.А.) использовались источники черенковского излучения с электродинамическими системами, поперечные размеры которых были порядка длины генерируемой волны. Эти генераторы хорошо зарекомендовали себя в диапазоне длительностей импульсов  $\sim 10$  нс. Несмотря на высокую длительность

электронного пучка  $\sim 1$  пс существенного увеличения, длительности импульса СВЧ излучения зарегистрировано не было. В дальнейших экспериментах с регулировкой мощности выходного СВЧ излучения (1981–1982 гг.) было показано, что можно увеличить длительность СВЧ импульсов при уменьшении их пиковой мощности. Эти исследования показали, что в традиционных источниках черенковского излучения с малыми поперечными размерами уже достигнут уровень СВЧ мощности, при котором с характерным временем около 10 нс развиваются вторичные нелинейные процессы, ограничивающие выходную СВЧ энергию.

Для достижения планируемых ранее параметров СВЧ генератора (мощности и длительности импульса) было предложено использовать пространственно развитые электродинамические системы, в которых сохраняется высокий уровень мощности выходного излучения при уменьшении плотности СВЧ энергии в объеме источника. Пионерские экспериментальные исследования в этом направлении (Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В.) были вдохновлены теоретическими исследованиями кафедры радиофизики СВЧ (Канавец В.И., Черепенин В.А., Слепков А.И., Афонин А.М.). Были созданы релятивистский генератор поверхностных волн (1981–1982 гг., Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Плетюшкин В.А.) и релятивистский генератор дифракционного излучения (1982 – 1983 гг., Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В., Канавец В.И., Плетюшкин В.А.). На генераторах этого типа впервые удалось преодолеть рубеж длительности СВЧ импульса в 100 нс при высоком уровне мощности СВЧ излучения.

В последующих экспериментах с генераторами с пространственно развитыми электродинамическими системами была обнаружена характерная для сильноточных взрывоэмиссионных катодов, временная и пространственная нестабильность пучка релятивистских электронов. Для изучения этого процесса были проведены пионерские исследования по количественному анализу функции распределения электронов РЭП методом рассеяния лазерного излучения (1983–1984 гг., Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В.), для чего совместно с ВНИИФТРИ был создан уникальный диагностический комплекс. Исследования транспортировки РЭП в вакуумных дрейфовых каналах позволили изучить динамику расширения электронного пучка за счет разлета катодной плазмы взрывоэмиссионного катода и выявить детали процесса формирования РЭП в коаксиальных диодах с магнитной изоляцией.

В ходе экспериментов совместно с ИОФ АН СССР был предложен и реализован метод импульсной магнитной компрессии, который позволил в течение микросекунды стабилизировать положение пучка в дрейфовом канале (1984 – 1988 гг., Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В.). Исследование изменений пространственного распределения плотности тока пучка по мере прохождения вакуумного дрейфового канала позволило связать их с развитием диокотронной неустойчивости (1984 – 1988 гг., Александров А.Ф., Веснин В.Л., Галузо С.Ю., Кубарев В.А., Михеев В.В., Плетюшкин В.А., Сергиенко В.Ю.). Был впервые для пучка микросекундной длительности реализован ме-

год стабилизации его пространственного распределения при использовании взрывоэмиссионного катода с конической эмитирующей поверхностью (1989 – 1992 гг., Александров А.Ф., Веснин В.Л., Галузо С.Ю.). Измерения радиально-го профиля плотности тока РЭП на выходе черенковского СВЧ генератора поверхностной волны позволили зарегистрировать эффект воздействия сильного высокочастотного поля на расширение пучка (1986 – 1988 гг., Александров А.Ф., Веснин В.Л., Галузо С.Ю., Кубарев В.А., Михеев В.В., Плетюшкин В.А., Сергиенко В.Ю.), что послужило дополнительным обоснованием необходимости снижения плотности СВЧ энергии.

В экспериментах был обнаружен еще один механизм ограничения длительности генерации – приповерхностные вторично эмиссионные разряды, как стартовая, так и нелинейная стадия существования которых была теоретически объяснена в 1982–1990 гг. (Галузо С.Ю., Одинцова Н.В.).

Работа с СВЧ генераторами с пространственно развитыми электродинамическими системами выявила ряд трудностей в обеспечении одночастотного режима взаимодействия потока и СВЧ поля. Для преодоления этих ограничений проводились исследования источников черенковского излучения с выходной пространственно развитой секцией, построенных по схеме умножителей частоты (1990–1998, Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Кузнецов А.М., Канавец В.И.).

## **КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА**

Большой цикл исследований колебаний, шумов и различных волновых процессов проводился на кафедре под общим руководством А.А. Зайцева большим коллективом сотрудников и аспирантов кафедры (М.Я. Васильева, Л. Пекарек, Г.С. Леонов, И.А. Савченко, Г.В. Смирнов, Б.Н. Швилкин, В.В. Ильинский, Л.И. Маслова, А.К. Ахмедов и др.). Изучены анодные колебания при положительном анодном падении потенциала, а так же электростатические колебания в зоне головы положительного столба тлеющего разряда и вблизи накаливаемого катода. Установлен физический механизм этих колебаний и предложены методы их устранения. Исследованы спектры нерегулярных надтепловых шумов, возникающих в плазме установившегося газового разряда и на их основе разработаны эффективные газоразрядные источники шума.

Предложен и успешно использован метод искусственного возбуждения ионизационных волн (страт) малой амплитуды, позволивший изучить их пространственно-временное развитие, дисперсионные свойства и инкремент. Нелинейное взаимодействие различных типов самовозбужденных страт большой амплитуды показало, что самовозбужденные страты одного типа подавляются возбужденными извне стратами того же или другого типа, и предложен механизм взаимодействия страт. Разработан способ управления амплитудой (и полного подавления) страт можно управлять с помощью модуляции разрядного тока. Предложен способ подавления бегущих страт при использовании разрядных трубок конической формы. Экспериментально были найдены диспер-

сионные кривые, инкременты и критические токи возбуждения ионнозвуковой неустойчивости, которые оказались в полном соответствии с предсказаниями теории (А.А. Рухадзе).



В.Е. Мицук, А.А.Зайцев, Б.Н. Швилкин, (нижний ряд), А.В. Назаренков, В.И. Савоскин, А.Ф. Александров, В. Лошкарев

Экспериментальные исследования пучковой неустойчивости в конвективном режиме в плазме при наличии группы быстрых электронов показали, что в силу пространственной ограниченности плазмы по длине взаимодействия неустойчивые моды имеют вид стоячей волны. В дальнейшем А.А. Зайцев изучал устойчивость плазмы газового разряда во внешнем продольном постоянном магнитном поле, в котором он обнаружил существование критической напряженности магнитного поля  $B_{кр}$ . При  $B > B_{кр}$  в плазме развивается винтовая неустойчивость. Этот результат полностью подтверждал теорию Б.Б. Кадомцева и А.В. Недоспосова и имел принципиальное значение для проблемы магнитного удержания плазмы в термоядерных реакторах. Именно в силу этого обстоятельства А.А. Зайцев много раз повторял и проверял свои результаты, направив их в печать с двухлетней задержкой и публикации аналогичных экспериментов Ленерта.

Изучая магнитоактивную плазму, В.Л. Грановский вместе со своими аспирантами (И.А. Васильева, А.С. Сыргий, В.С. Голубев, Ю.М. Алесковский, Э.И. Уразаков) установил, что при малых полях  $B < B_{кр}$  диффузия плазмы в магнитном поле подчиняется классической теории, причем для непроводящих стенок разрядной камеры будет амбиполярной. Полученный вывод был подтвержден методом диффузионных волн. Была исследована также азимутальная (холловская) диффузия в стационарной плазме, измерена ее скорость, проверено соотношение между скоростями прямой и поперечной диф-



фузии, магнитно-механический эффект холловского тока. Показано, что при  $V > V_{кр}$  начинается аномально быстрый уход заряженных частиц из плазмы (аномальная диффузия). В работах этой группы исследован также процесс распада (деионизации) плазмы в магнитном поле.

В работах Б.Н. Швилкина и аспирантов С.А. Постникова, М.И. Белавина, А.А. Сквороды, В.Е. Бондаренко детально изучена дрейфово-диссипативная неустойчивость бестоковой слабоионизованной неоднородной плазмы, создаваемой с помощью ВЧ разряда в длинных разрядных трубках при низком давлении рабочего газа (0.01 Торр), находящихся во внешнем магнитном поле.

Изучены особенности возбуждения неустойчивости, связанные с эффектами отступления от квазинейтральности в возмущениях и инерцией ионов.

Определены области существования неустойчивости по магнитному полю и давлению газа, исследован закон дисперсии. Распространение и поглощение волн в магнитоактивной плазме в неоднородном магнитном поле исследовалось Б.Н. Швилкиным и А.А. Сквородой. Полученные результаты применены для диагностики плазмы. Экспериментальные исследования проводились одновременно с теоретическими (А.В. Тимофеев) и оказались в хорошем соответствии.



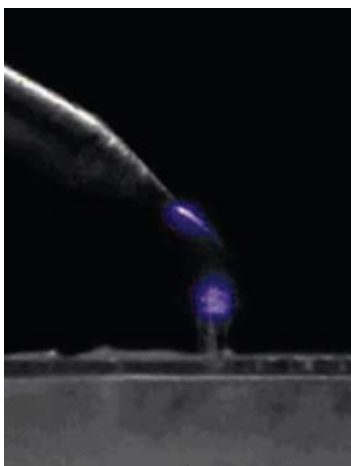
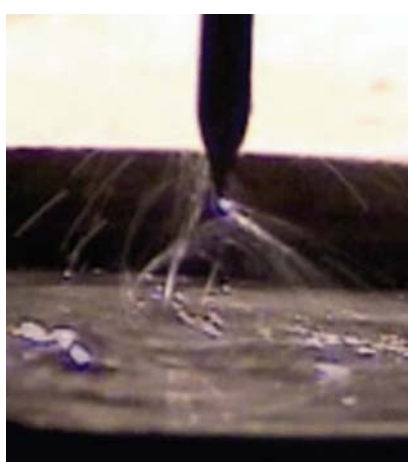
М.И. Белавин, А.А. Скворода, Н. Чернышова и А.В. Тимофеев (ИАЭ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ДОЛГОЖИВУЩИХ СВЕТЯЩИХСЯ ОБРАЗОВАНИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

Во второй половине 20 века, в ходе исследований плазмы различного типа разрядов, появилось понятие «долгоживущие светящиеся образования» (ДСО), которое впервые, было введено на кафедре физической электроники физического факультета МГУ в 1990 г. в работах Ершова А.П., Тимофеева И.Б., Александрова А.Ф., Черникова В.А., Юсупалиева У. и др., посвящен-

ных созданию долгоживущих светящихся объектов в плазме, или, так называемых, «долгоживущих плазменных образований». Эти объекты носят также название плазмоидов. Данные объекты были исследованы в связи с созданием особо ярких источников излучения, вопросов снижения сопротивления летательных аппаратов, воздействием плазмы на различные материалы и задачами плазмохимии.

Отличительной особенностью данных объектов является аномально большое время их существования (время свечения) по сравнению с временем их генерации разрядным источником. Другой особенностью является их автономность, то есть способность свободно перемещаться в пространстве сохраняя свою форму, размер и цвет в течение времени сравнимым с временем существования. По этим свойствам ДСО сходны с природными шаровыми молниями (ШМ). ДСО также представляют интерес с точки зрения фундаментальных свойств плазмы и различного рода структур в плазме, выяснения природы шаровых молний и неопознанных летающих объектов, а также в связи с различными приложениями. Кроме того, развитие представлений о ДСО может способствовать их приложениям в плазмохимии и в транспортировке энергии на большие расстояния.

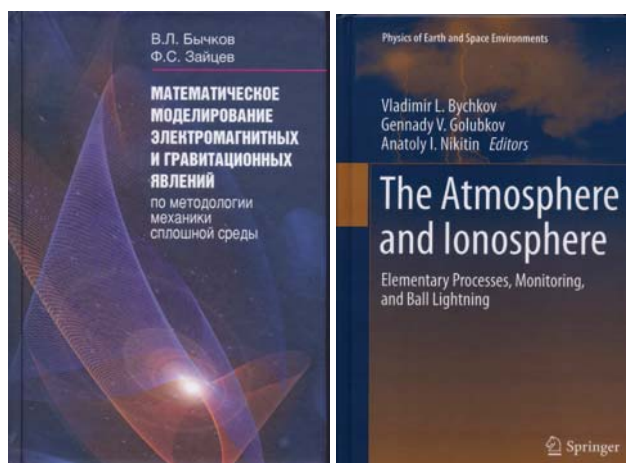


Структуры над поверхностью жидкости в коронном разряде

Множественная реализация «металлических» ДСО в капиллярном разряде

С этого времени на кафедре проводятся исследования ДСО различного типа, а также плазмоидов, созданных различного типа разрядами, такими, как капиллярный, коронный в воздухе, поверхностный импульсный и при их взаимодействии с различными материалами. Так, в цикле работ И.Б. Тимофеева, А.В. Бычкова и В.Л. Бычкова (2002–2006 гг.) исследовалось взаимодействие плазмы с парами органических веществ и полимерными материалами. Были получены аналоги природных шаровых молний, которые представляли всплывающие объекты – области пламени размером до 20 см и временем жизни в доли секунд. Природные аналоги таких ДСО наблюдаются в южных лиственных лесах при высокой температуре воздуха.

Другие аналоги природных шаровых молний были инициированы импульсным капиллярным плазмотроном с плазмообразующими вставками из смесей воска, парафина и порошков целлюлозы; их размеры достигали 1–2 см, а время жизни составляло 2с. В период 2008–2012 появился интерес к созданию ДСО на поверхности диэлектрических и горючих жидкостей при помощи импульсных и коронных разрядов. В работах Ершова А.П., Бычкова В.Л., Черникова В.А., Ваулина Д.Н. и Александрова А.Ф. были реализованы поверхностные импульсные разряды, в которых развитие разрядов сопровождалось воспламенением паров горючих материалов, а при исследовании коронных разрядов были получены долгоживущие объекты в виде фонтанов, светящихся столбиков (Тейлора) и других гетерофазных форм, показывающих как в экспериментальных газоразрядных условиях могут проявляться аналоги аномальных свойств шаровых молний.



Монографии по данной тематике, автором и редактором которых был В.Л. Бычков

В последние годы, в связи с исследованием шаровых молний природного происхождения, появляющихся при взаимодействии разряда линейной молнии с металлами, в работах В.Л. Бычкова, В.А. Черникова, А.С. Осокина и И.Г. Степанова получены ДСО при взаимодействии плазмы эрозионного разряда с оловом и смесью олова и свинца отличающиеся особенностью структуры. Ядро светящегося образования представляет собой металлических пар, а оболочка – пленку из металла 10 мкм толщиной. Оценки удельной энергии такого образования дают величину порядка  $10^9$  Дж/м<sup>3</sup>, что сравнимо с энергозапасом природных шаровых молний и показывает на возможность существования высокоэнергетичных объектов, перспективных для решения некоторых задач проблемах плазмостимулированного горения. На рисунке выше было показано множественное образование таких ДСО.

В связи с тем, что природные ДСО и шаровые молнии появляются в периоды грозовой активности, проводятся исследования по процессам ионизации в тропосфере и нижней ионосфере с участием заряженных частиц. Проведены исследования по определению эффективного значения электрического поля, при котором развивается лавина в сухом, влажном и горячем воздухе при нормальных и аномальных геофизических условиях, на высотах от поверхности земли до ионосферы. Показано, что быстрое развитие разрядов вблизи различных предметов с острыми концами может приводить к возникновению пожаров, взрывов и др. аномальных явлений.

Создана модель, объясняющая, как в облаках могут образовываться гелеометеоры, которые в период осадков могут падать на землю и переносить на



## ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК – 2016

своей поверхности микроорганизмы с места на место. Исследовано движение ионных облаков, созданных коронным разрядом на Земле в сторону облаков. Показано, что подобные облака с потоками воздуха могут подниматься до уровня облаков, где происходит конденсация паров воды. Эти процессы стимулируют выпадение осадков, что представляет интерес для сельского хозяйства, транспорта и др.

### ИЗ ИСТОРИИ КАФЕДРЫ



Лаборатория газовых разрядов, 1968 год



Г.С. Солнцев и А. von Engel (Берлин, 1968 г.)



В газоразрядном практикуме

КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

## ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА



Сотрудники лаборатории твердотельной электроники в юбилейном 1980 году

### ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

В истории кафедры заметное и значительное место занимает лаборатория электронной микроскопии, которая в течение ряда лет (1948÷1953 гг.) существовала даже в ранге отдельной кафедры физического факультета под руководством профессора Григория Вениаминовича Спивака. В определенные годы численный состав лаборатории составлял четверть общего числа сотрудников кафедры физической электроники.

За время своего существования лаборатория внесла большой научный и практический вклад в области электронной оптики, сканирующей, просвечивающей, эмиссионной и зеркальной электронной микроскопии: разработка новых приборов, устройств и методов электронно-микроскопических исследований, получения важных научных результатов.

Сотрудники лаборатории активно участвовали в организации научных конференций, издании учебников и монографий. Так, в разные годы членами

Научного Совета РАН по электронной микроскопии являлись: Спивак Г.В., Петров В.И., Лукьянов А.Е., Рау Э.И.



Основатель направления электронной микроскопии на кафедре – профессор Г.В. Спивак и (слева) и Геннадий Васильевич Сапарин – прогулка на теплоходе во время поездки в Японию на конференцию по электронной микроскопии – 1966 год

Лукьянов А.Е. в течение многих лет редактирует статьи в журнале «Известия РАН, серия Физическая» по материалам конференций по электронной микроскопии. Дюков В.Г. является соавтором двух монографий: Седов Н.Н., Дюков В.Г., Непийко С.Н. «Потенциальный контраст в сканирующей электронной микроскопии», Дюков В.Г., Кудеяров В.П., «Оптическая растровая микроскопия». По электронной сканирующей микроскопии в МГУ издано два учебных пособия: Петров В.И., Лукьянов А.Е. «Растровая электронная микроскопия», Сапарин Г.В. «Введение в растровую электронную микроскопию». Рау Э.И. является членом Оргкомитетов многих Российских и Международных конференций по электронной микроскопии.

К основным достижениям мирового уровня относятся:

- разработка стробоскопического режима работы электронных микроскопов, позволяющего исследовать на микроуровне динамику быстропротекающих физических процессов (Спивак Г.В., Седов Н.Н., Дубинина Е.М., Дюков В.Г., Сапарин Г.В., Петров В.И.);
- создание первого в стране действующего лабораторного макета растрового электронного микроскопа (Спивак Г.В., Сапарин Г.В.);
- разработка одного из первых в мире растрово-зеркального электронного микроскопа (Спивак Г.В., Рау Э.И., Лукьянов А.Е.);
- разработка метода цветной катодолюминесценции в сканирующей электронной микроскопии (Сапарин Г.В., Обыден С.К.);

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

– разработка методов и аппаратуры для микротомографии трехмерных микроструктур в обратно-рассеянных электронах и бесконтактного детектирования электронно-индуцированных потенциалов в сканирующем электронном микроскопе (Рау Э.И.);



Президент Всемирной Ассоциации электронной микроскопии, родоначальник рентгеновского микроанализа профессор Кастен Р. (Castaing R.) - гость кафедры, 1978г. (Лукьянов А.Е., Петров В.И., Кастен Р., Спивак А.Е., Дубинина Е.М., Рау Э.И.)

В лаборатории в различные годы были проведены следующие пионерские научные исследования:

– впервые визуализирована доменная структура ферромагнетиков и обнаружено явление разрыва доменных стенок под воздействием импульсных магнитных полей в тонких магнитных пленках (Спивак Г.В., Петров В.И., Ломоносовская премия 1972 г. совместно с Телесниным Р.В. и Колотовым О.С.);

– теоретически и экспериментально исследован механизм образования контраста изображений электрических и магнитных микрополей в электронных эмиссионных, зеркальных и растровых микроскопах (Спивак Г.В., Седов Н.Н., Дубинина Е.М., Дюков В.Г., Сапарин Г.В., Невзоров А.Н., Лукьянов А.Е., Рау Э.И., Гвоздовер Р.С., Шишкин Б.Б.);

– исследованы эффекты активации и «памяти» в катодолюминесцентных материалах (диэлектрики, полупроводники), катодолюминесцентные спектры

полупроводниковых материалов в широком диапазоне излучений (Сапарин Г.В., Обыден С.К., Петров В.И.);

– обоснован новый сценарий кинетики зарядки диэлектрических мишеней под воздействием облучения электронами средних энергий (Рау Э.И.);

По материалам исследований сотрудниками лаборатории получено свыше 50 авторских свидетельств и патентов на изобретения, опубликовано более 1000 статей в отечественных и зарубежных журналах.

Все эти годы работы в области сканирующей электронной микроскопии были тесно связаны с прикладными исследованиями, выполнялись крупные проекты по хоздоговорным темам с ведущими организациями МЭП, МОМ, Космическим Агентством, академическими НИИ. Лаборатория имела гранты РФФИ, Минообразования, Миннауки. Одновременно проводились плодотворные исследования в кооперации с зарубежными университетами в следующих странах: Германия (Берлин, Тюбинген, Мюнстер), Франция (Реймс), Англия (Лондон), Австрия (Вена), Китай (Юннань), Сингапур, Австралия (Сидней), США (Бостон), Италия (Тренто). Указанные работы велись в рамках совместных научных проектов CNRS, INTAS, CRDF, DFG.

Многие сотрудники, защитившие на кафедре кандидатские и докторские диссертации в области электронной микроскопии, продолжают успешно работать на факультете и в других ведущих институтах страны. Среди них: Невзоров А.Н., Филиппов М.Н., Гостев А.В., Антошин М.К., Галстян В.Г., Быков М.В., Добрынина Е.С., Иванников П.В., Сасов А.Ю., Степович М.А., Павлюченко О.П., Голубков В.В., Шакманов В.В., Якунин С.Н., Лихарев С.К., Татаринцев А.А., Карелин Н.М., Назаров М.В., Комолова Л.Ф., Перловский Г.А.

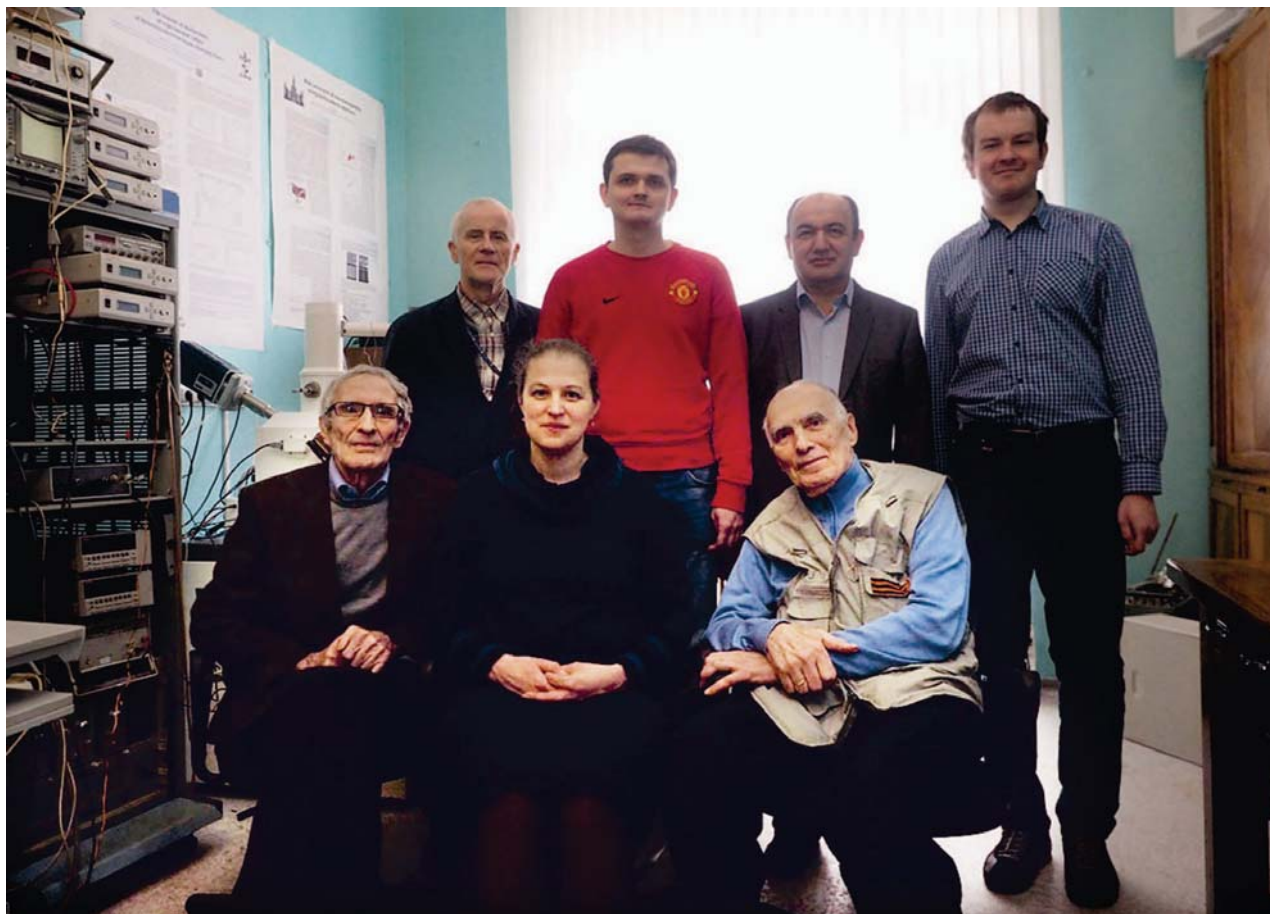
## **КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАФЕДРЕ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

Электронная микроскопия начала бурно развиваться на кафедре под руководством профессора Спивака Г.В. в середине 50-х годов прошлого века. Эксперименты проводились на различных типах электронных микроскопов, часто самодельных: термоэмиссионные, автоэмиссионные, электронно-зеркальные, просвечивающие, растровые. На всех микроскопах впервые в мире был реализован принцип стробоскопии, что позволило исследовать быстропротекающие процессы на поверхности образцов: движение магнитных и электрических доменов, переключение полупроводниковых диодов, пьезоэлектрические волны и т.д.

Большой вклад в теорию формирования контрастов изображений магнитных и электрических микрополей внес Седов Н.Н., который впервые решил обратную математическую задачу – восстановления распределения потенциалов по контрасту электронно-микроскопического изображения. На основе расчетов выполнялись пионерские экспериментальные работы на различных мик-

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

роскопах: растровом (Сапарин Г.В., Комолова Л.Ф., Обыден С.К.), эмиссионном (Дубинина Е.М., Шишкин Б.Б., Дюков В.Г., Невзоров А.Н.), зеркальном (Лукьянов А.Е., Гвоздовер Р.С., Рау Э.И., Бутылкина Н.А.), просвечивающем (Петров В.И., Крохина А.И.). На сканирующем электронном микроскопе были получены первые снимки в цветном катодолюминесцентном контрасте (Сапарин Г.В.).



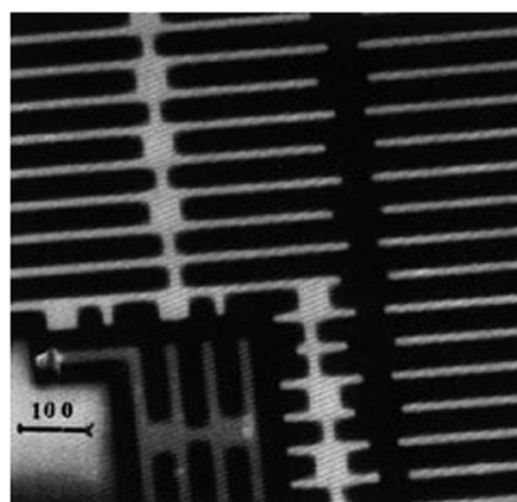
Сотрудники лаборатории в 2016 году (проф. Рау Э.И., к.ф.-м.н. Зыкова Е.Ю., к.ф.-м.н. Лукьянов А.Е., к.ф.-м.н. Зайцев С.В., аспирант Купреенко С.Ю., к.ф.-м.н. Хайдаров А.А., к.ф.-м.н. Татаринцев А.А.).

В лаборатории в настоящее время развиваются следующие направления:

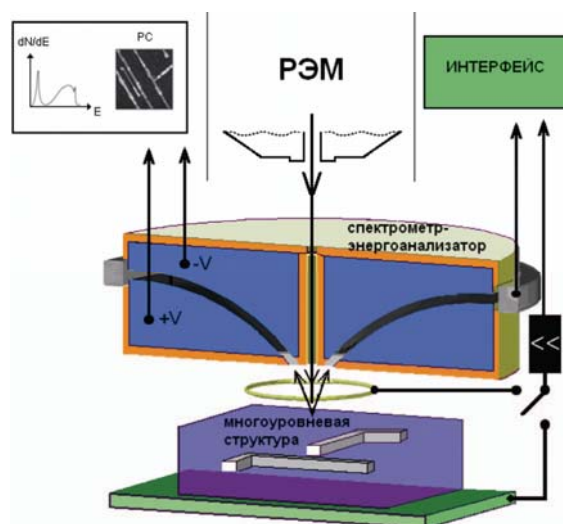
- физика взаимодействия сфокусированных электронных пучков с твердотельными средами;
- электронно-зондовая диагностика материалов и приборов полупроводниковой микро- и нанoeлектроники;
- томографические исследования трехмерных структур микро и нанoeлектроники в обратнорассеянных и вторичных электронах;
- исследование эффектов зарядки диэлектриков при электронном и ионном облучении, радиационная физика в микроэлектронике и космонавтике.



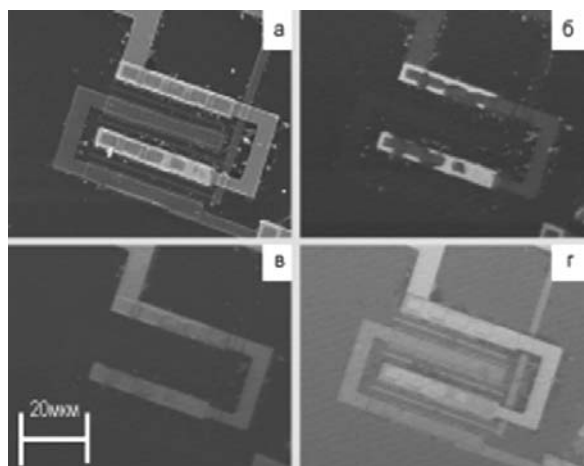
Разработанный фирмой "REM-technik" прибор на основе изобретения Рау Э.И. для бесконтактного детектирования электрических потенциалов



Слева – изображения во вторичных электронах, справа – в режиме электронно-индуцированного потенциала



Сканирующий электронный микроскоп LEO (ZEISS) и электронный спектрометр-микротомограф



Томографические изображения фрагмента трехслойной интегральной микросхемы, снятые на сканирующем электронном микроскопе (снимок слева), снабженном тороидальным спектрометром (схема справа), при  $E_0 = 20$  кэВ: (а) – интегральное по глубине изображение в стандартном режиме РЭМ; (б) – изображение поверхностных деталей с энергией отраженных электронов  $E_S = 19,9$  кэВ; (в) – шина металлизации верхнего уровня,  $E_S = 19,5$  кэВ; (г) – шины металлизации верхнего и нижнего уровня,  $E_S = 18,5$  кэВ



Первая в СССР действующая модель РЭМ – 1957 год

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

Экспериментальные и теоретические исследования в области взаимодействия ускоренных ионов с веществом являются одним из основных направлений в научной деятельности кафедры. Первые работы на нашей кафедре в этом направлении были инициированы профессором Григорием Вениаминовичем Спиваком. Еще в середине 30-х годов прошлого века Г.В. Спивак уделял значительное внимание изучению взаимодействия компонентов плазмы с электродами [Г.В. Спивак, А.А. Зайцев. «Обмен энергией между атомами неона, аргона и ртути и твердой стенкой». ДАН СССР, 1935, 2, с. 118]. В начале 50-х годов прошлого века под его руководством проводились исследования ионно-



го травления материалов и был создан ряд установок для выявления кристаллической структуры и дефектов в различных материалах (Г.В. Спивак, В.Е. Юрасова, Ф.Ф. Кушнир), которые были удостоены высоких наград на всесоюзных и международных выставках.

В 1957 году Вера Евгеньевна Юрасова (ученица профессора Г.В. Спивака) обнаружила анизотропию распыления монокристаллов при облучении ионами килоэлектронвольтных энергий [В.Е. Юрасова, Н.В. Плешивцев, И.В. Орфанов. ЖТФ, 1958, **28**, 1966]. Наряду с экспериментами Г. Венера (1955), М. Томпсона (1959) и Б. Перович (1962) эксперименты В.Е. Юрасовой показали, что распыление не является термоэмиссионным явлением, а происходит вследствие передачи импульса атомам мишени в столкновениях с ними бомбардирующих ионов.

Работы В.Е. Юрасовой по изучению распыления и вторичной ионной эмиссии стали новой вехой в развитии исследований взаимодействия атомных частиц с твердым телом. Именно благодаря этим и последующим работам В.Е. Юрасовой исследования в этой области сформировались как самостоятельное научное направление и вышли на мировой уровень. Учениками В.Е. Юрасовой в этот период были В.И. Бржезинский, В.М. Буханов, Л.Н. Невзорова (Левыкина) и В.М. Ефременкова. В.М. Буханов после защиты кандидатской диссертации перешел на кафедру общей физики, где продолжает трудиться и поддерживает контакт с коллективом бомбардиров кафедры физической электроники.

В середине 60-х годов прошедшего столетия по инициативе В.Е. Юрасовой на кафедре были начаты работы по компьютерному моделированию взаимодействия ионов с кристаллами. В.А. Эльтеков, Д. Карпузов (ныне д.ф.-м.н., профессор, Канада) и В.И. Шульга (сотрудник НИИЯФ МГУ, д.ф.-м.н.) внесли огромный вклад в развитие этого важного направления в исследовании взаимодействия ионов с веществом. Следует отметить, что сегодня д.ф.-м.н. В.И. Шульга является одним из ведущих специалистов в мире в области компьютерного моделирования распыления.

70-е годы ознаменовались значительными успехами в области экспериментальных исследований распыления. Впервые был обнаружен «квантовый эффект в распылении»: установлено, что распыление и вторичная ионная эмиссия изменяются при переходе через точку Кюри [В.Е. Юрасова, В.С. Черныш, М.В. Кувакин, Л.Б. Шелякин. Письма в ЖЭТФ, 1975, **21**, 197–199]. Теория обнаруженного эффекта была разработана в кандидатских диссертациях сотрудника кафедры М.В. Кувакина и аспирантки Е.Ю. Карповой.



В.Е. Юрасова

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ



Группа Веры Евгеньевны Юрасовой в 1965 году. Слева направо: 1-й ряд – лаборант Тамара, В.Е. Юрасова, Н.Г. Тимофеева, Л.Н. Невзорова (Левыкина), В.М. Буханов, 2 ряд – В.М. Ефременкова, дипломантка, О. Попова, Ю.А. Прохоров, М.В. Кувакин, 3 ряд - С.Ф. Белых, Л.Б. Шелякин, И. Бунин, В.И. Шульга, дипломник

Впоследствии было экспериментально продемонстрировано влияние полиморфного превращения в кристаллах на эмиссию распыленных атомов, ионов и фотонов [V.S. Chernysh, A. Johansen, L. Sarholt-Kristensen. Nucl. Instr. and Methods, 1981, **191**, 253; Ю.А. Бандурин, В.И. Бачурин, В.Г. Дробнич, С.С. Поп, В.С. Черныш, В.Е. Юрасова. Письма в ЖТФ, 1982, **8**, 760].

Важную роль в развитии представлений о явлении распыления и его роли в формировании состава облучаемой ионами поверхности сыграли эксперименты по исследованию угловых распределений частиц, распыленных из сплавов, поставленные В.С. Чернышом во время его научной стажировки в Дании [Н.Н. Andersen, J. Chevallier, V.S. Chernysh. Nucl. Instr. and Methods, 1981, **191**, 241; Surf. Science, 1982, **123**, 39]. В этом цикле исследований был впервые обнаружен эффект нестехиометрического распыления компонентов по углам эмиссии и было показано, что распыление невозможно объяснить только с точки зрения столкновительных механизмов.

В 80-е годы активно развивалась экспериментальная база: создан уникальный сверхвысоковакуумный ускоритель ионов [А.А. Андреев, В.И. Бачурин, С.П. Линник, В.С. Черныш. В сб. “Вторичная ионная и ионно-фотонная эмиссия” Харьков, 1983, с. 309 – 311], установка для исследования взаимодействия ионов с веществом по методу совпадений [Г.А. Дубский, В.Г. Неудачин, Н.М. Персианцева, Л.Б. Шелякин, В.Е. Юрасова. Поверхность, 1985, **1**, 64]. Была сконструирована также установка для изучения вторичной

ионной эмиссии с угловым и энергетическим разрешением [К.Ф. Миннебаев, В.С. Черныш. В сб. "Вторичная ионная и ионно-фотонная эмиссия". Харьков, 1988, ч.2, с.141 – 143; I. Neshev, S. Tzanev, K.F. Minnebaev, V.S. Chernysh. Vacuum, 1992, **43**, 627 – 629].



Научная группа взаимодействия ионов с веществом: Л.Б. Шелякин, второй ряд: Л. Исаева, Б.М. Мамаев, Гюнтер Шульце (аспирант из ГДР), О. Попова, Н.Г Тимофеева, третий ряд: В.И. Бачурин, С.П. Линник, В.С. Черныш и А.А. Андреев (1979 год)

Использование этих уникальных установок позволило:

– обнаружить осцилляции в энергетическом спектре вторичных возбужденных ионов, указывающие на квантовую интерференцию различных состояний ионов и мишени и открывающие новый экспериментальный метод определения электронной структуры поверхности [В.А. Абраменко, Д. Лебякин, И.Ф. Уразгильдин, В.Е. Юрасова. Письма в ЖЭТФ, 1986, **44**, 398–401];

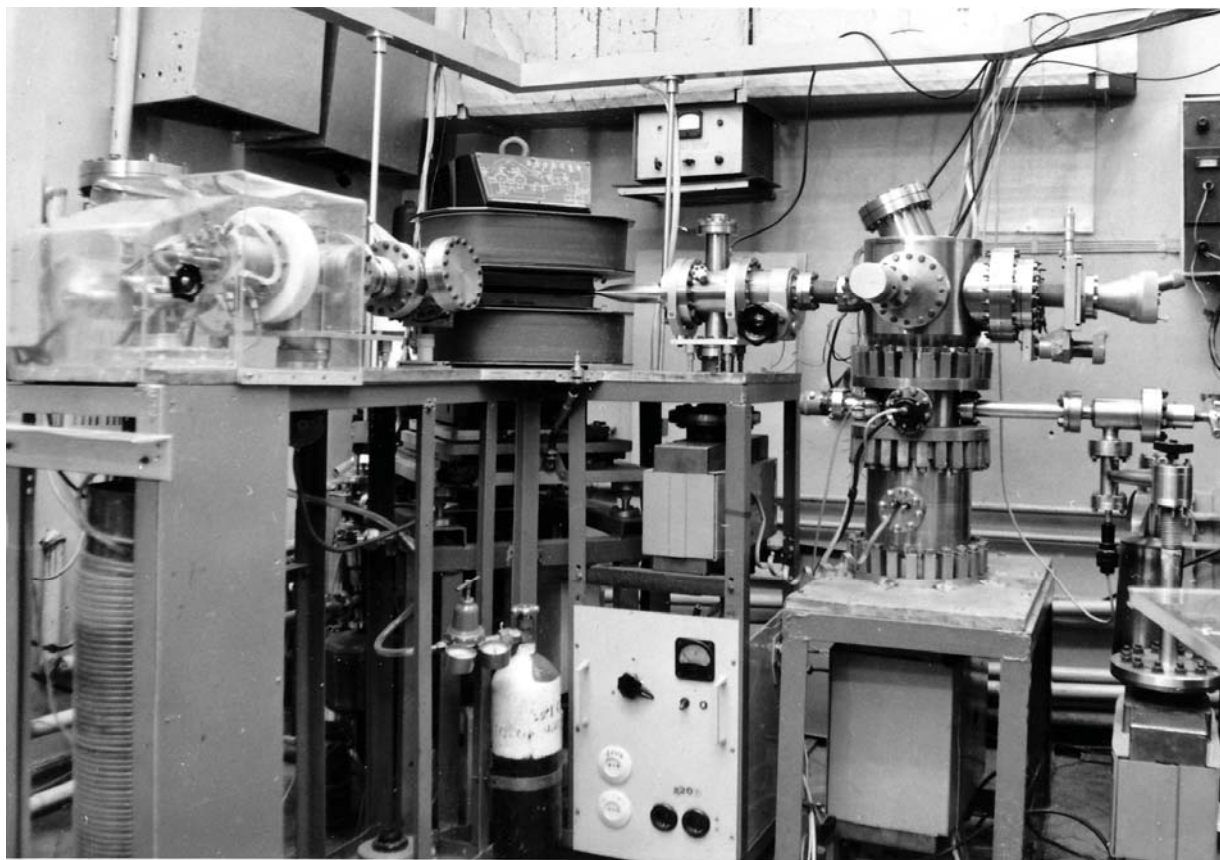
– изучить механизмы вторичной ионной эмиссии [В.М. Буханов, К.Ф. Миннебаев, И.Ф. Уразгильдин, В.С. Черныш. ЖЭТФ, 1989, **10**, 1505–12];

– продемонстрировать, что масс-спектрометрия вторичных ионов может использоваться не только для диагностики состава, но и для определения кристал-



И.Ф.Уразгильдин

лической структуры тонких поверхностных слоев [A. Johansen, E. Johnson, L. Sarholt-Kristensen, S. Steenstrup, H.H. Andersen, V.S. Chernysh, V.M. Buchanov, I.N. Ivanov, K.F. Minnebaev. Nucl. Instr. and Meth., 1991, **B61**, 21–26].



Ускоритель ионов на энергии ионов от 2 до 10 кэВ. Уникальность ускорителя состоит в том, что мишень, находящаяся в сверхвысоком вакууме ( $10^{-9}$  Торр) облучается сепарированным по массам ионным пучком высокой интенсивности ( $\sim 0,1$  мА/см<sup>2</sup>). Решающий вклад в создание ускорителя внесли А.А. Андреев, В.И. Бачурин и С.П. Линник. На ускорителе выполнены эксперименты, которые явились основой восьми кандидатских и одной докторской диссертаций

В эти же годы под руководством В.Е. Юрасовой В.Н. Самойловым, В.А. Эльтековым и А.С. Мосуновым проводились компьютерные расчеты распыления. А И.Ф. Уразгильдин, возвратившийся на кафедру после завершения деятельности в комитете комсомола факультета, активно приступил к теоретическим исследованиям неупругих процессов при взаимодействии ионов с поверхностью.

Даже в «провальные» 90-е годы исследования по теме продолжали развиваться. И.Ф. Уразгильдин с учениками разрабатывал теоретические основы неупругих процессов, сопровождающих взаимодействие ионов с веществом [D.V. Klushin, M.Y. Gusev, I.F. Urazgildin. Nucl. Instr. and Meth., 1995, **B100**, 316]. Эти работы, выполненные на высоком научном уровне, были заслуженно оценены в нашей стране и за рубежом. Наряду с этим были получены новые экспериментальные данные по распылению мишеней сложного состава [В.С. Тубольцев, В.С. Черныш, В.С. Куликаускас. Письма в ЖЭТФ, 1996, **63**,

507–510] и исследовались особенности распыления одноэлементных мишеней [V.S. Chernysh, W. Ekstein, A.A. Haidarov, V.S. Kulikauskas, E.S. Mashkova, V.A. Molchanov. Nucl. Instr. and Meth. 2000, **B160**, 221].



Предзащита кандидатской диссертации на кафедре. Профессор И.Ф. Уразгильдин и аспирантка Е.Ю. Усман

В начале XXI века были продолжены традиционные для кафедры исследования угловых распределений атомов, распыленных из одноэлементных мишеней и сплавов (А.С. Патракеев, В.С. Черныш). В этих экспериментах, сопровождавшихся компьютерным моделированием, проводившимся В.И. Шульгой, были обнаружены сильные отклонения от предсказаний общепринятой теории Зигмунда. В.Е. Юрасова совместно с Э.И. Рау развивают исследования эффектов зарядки диэлектриков при электронном и ионном облучении. Кроме того, работы по исследованию взаимодействия ионов с веществом вышли на новый уровень – уровень наночастиц.

И.Ф. Уразгильдиным и И.К. Гайнуллиным были начаты теоретические исследования процессов переарядки при взаимодействии частиц с наносистемами. А в 2007 году по инициативе В.С. Черныша создана совместная лаборатория ионно-пучковых нанотехнологий физического факультета МГУ, НИИЯФ МГУ и ОАО «Тензор», основной задачей которой является разработка физических основ развития современных нанотехнологий с использованием ионных пучков.

Недавно на кафедре Ю.Г. Коробовой были начаты теоретические исследования структуры кластерных ионов.



Ю.Г. Коробова

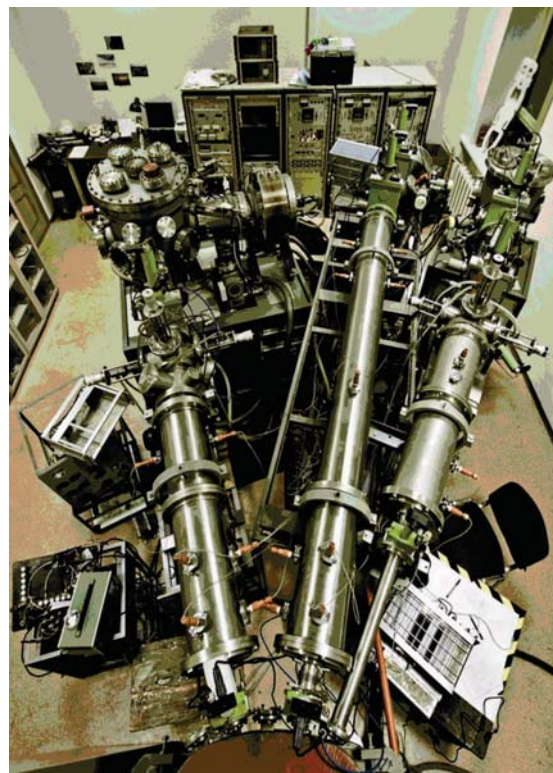
## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

В конце 2010 года в лаборатории при поддержке ОАО «Тензор» был реализован проект по созданию ускорителя газовых кластерных ионов. На созданном ускорителе получены пучки ускоренных кластерных ионов инертных газов, в составе которых наблюдаются ионы от мономеров до кластеров, состоящих из нескольких тысяч атомов [А.А. Andreev, V.S. Chernysh, Yu.A. Ermakov, А.Е. Ieshkin. *Vacuum*, 2013, **91**, 47 – 53]. Уже первые эксперименты, выполненные на этом ускорителе, привели к обнаружению нового механизма распыления кластерными ионами [V.S. Chernysh, А.Е. Ieshkin. Yu.A. Ermakov. *Appl. Surf. Sci.*, 2015, **326**, 285].

Наряду с этим в совместной лаборатории при поддержке ОАО «Тензор» был создан уникальный ускорительный комплекс на энергии атомарных ионов до 500 кэВ. В рамках ряда хозяйственных договоров с предприятиями г. Зеленограда на созданном комплексе проводились исследования по использованию ионной имплантации для создания наноструктур, в частности, для улучшения кристаллической структуры пленок кремния, выращенных на сапфире (так называемые КНС структуры) [А.А. Шемухин, Ю.В. Балакшин, В.С. Черныш, А.С. Патракеев и др. Письма в ЖТФ, 2012, **38**, 83]. В кратчайшие сроки лаборатории удалось завоевать ведущие позиции в нашей стране в этой области. Проводятся также исследования, направленные на развитие современных методов изучения наноматериалов и нанообъектов. В частности, в последние годы проводится освоение спектроскопии рассеяния ионов средних энергий, которая позволяет изучать состав поверхности разрешением по глубине анализа на уровне монослоя.



Первый в России ускоритель газовых кластерных ионов



Ускорительный комплекс на энергии до 500 кэВ

Исследования по взаимодействию ионов с веществом, проводимые на кафедре, всегда занимали передовые позиции в отечественной и мировой науке.

Об этом свидетельствует, в частности, тот факт, что лабораторию в разные годы посещали такие корифеи как профессора Г. Венер (США), М. Томпсон, Дж. Коллигон и Д. Картер (Англия), Р. Бериш (Германия), Б. Перович (Югославия), Я. Кистемакер (Голландия), П. Зигмунд (Дания). Проводились исследования в рамках международного сотрудничества с Институтом ядерных наук Белградского университета (1975 – 1982 гг.) и с Институтом Эрстеда Копенгагенского университета (1985–1992 гг.).

Несмотря на свою большую историю тема «Взаимодействие ионов с веществом» не потеряла свою актуальность. Удивительно, но актуальность исследований в этой области из года в год только возрастает. Ежегодно в мире проходит более десяти крупных конференций, посвященных в той или иной мере этой тематике. В частности, под патронажем нашей кафедры в России проходит крупная международная конференция «Взаимодействие ионов с веществом», организуемая при активном руководстве В.Е. Юрасовой.



Оргкомитет конференции по взаимодействию ионов с поверхностью ВИП-71. Слева направо, стоят: Л.Б. Беграмбеков, А.А. Писарев, А.М. Борисов, Д.С. Коллигон, В.А. Курнаев, А.А. Семенов, П.А. Карасев; сидят: А.И. Титов, В.Е. Юрасова, И.И. Шкарбан

Наши аспиранты и молодые сотрудники регулярно участвуют в ведущих научных форумах.

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ



Сотрудники совместной лаборатории физического факультета МГУ, НИИЯФ МГУ и ОАО «Тензор» на международной конференции по атомным столкновениям в твердом теле ICACS-24, Япония, Киото, 2012. М.н.с. Ю.В. Балакшин (обучался на кафедре общей ядерной физики, в том числе в аспирантуре), с.н.с., к.ф.-м.н. А.А. Шемухин (выпускник кафедры физической электроники) и м.н.с., к.ф.-м.н. А.Е. Иешкин (закончил кафедру и аспирантуру по кафедре физической электроники)



Сотрудники кафедры О. Нишак и А. Иешкин с японскими коллегами на международной конференции по атомным столкновениям в твердом теле ICACS-25, Венгрия, Дебрецен, 2014

## ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Изучение физических процессов, происходящих на поверхности твердых тел при воздействии низкоэнергетического электронного облучения, были начаты на кафедре в 1967 году под руководством Е.М. Дубининой. Первые работы, проведенные в группе в 1967 – 1968 гг., были посвящены изучению возможности использования электронного облучения для формирования полимерных пленок, локализованных в области электронного пучка. Для этого ис-



пользовались низко-энергетические электроны в диапазоне энергий 0,1 – 3 кэВ. С 1969 г. в группе Е.М. Дубининой основное внимание было уделено получению с помощью электронного луча пленок на основе различных кремний-органических соединений. С помощью правильно подобранных параметров электронного пучка можно было создавать пленки с различными, заранее заданными свойствами. Большой вклад в эти исследования внесли сотрудники кафедры А.С. Овсяницкий и Г.П. Нетишенская и аспиранты М. Саад Эльдин, В.П. Новожилов и С.С. Еловиков. Свойства получаемых пленок изучались с помощью традиционных электрофизических методов. Привлекались также современные структурные методики, такие как просвечивающая электронная микроскопия. В результате экспериментов были получены пленки с широким спектром свойств – от хороших диэлектриков, не уступающих лучшим образцам неорганических материалов, применяемых в тонкопленочных конденсаторах, до резисторов с различными величинами удельного сопротивления.

В 1975 году в группе были начаты работы в новом направлении по исследованию низко-энергетической электронной стимуляции осаждения металла на поверхности твердых тел при их бомбардировке электронами низких энергий. В этих работах приняли участие аспиранты Г. Тюлиев, В.В. Бурмистров, Б.Г. Атабаев и Н.Н. Новикова. Было обнаружено, что под действием даже низкоэнергетической электронной бомбардировки на поверхности твердого тела создается достаточное количество радиационных дефектов, которые могут служить дополнительными центрами конденсации атомов на поверхности подложки. В результате оказывается возможным локальное осаждение пленок металла в области взаимодействия электронов с подложкой. Итогом работы было создание опытных образцов металлических пленок, полностью локализованных на следе электронного пучка. Дополнительные исследования показали, что создаваемые низкоэнергетическим электронным облучением радиационные дефекты в некоторых случаях способствуют снижению температуры эпитаксии и позволяют выращивать на поверхности эпитаксиальные пленки различных металлов и полупроводников.



Е.М. Дубинина и С.С. Еловиков

В работе аспирантов Б.Г. Атабаева и Н.Н. Новиковой было также показано, что облучение электронами низких энергий может оказывать влияние на уже сформированный осадок, например, усиливать миграционную коалесцен-

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

цию островковых металлических пленок. В некоторых случаях электроны приводили к увеличению скорости коалесценции островков более чем на порядок. Возможность управления свойствами растущей пленки электронами позволила получить островковые пленки с заданными размерами островков, которые использовались для исследований различных размерных эффектов.

В период с 1978 по 1995 гг. был выполнен цикл работ, связанных с изучением радиационного дефектообразования и процесса разрушения поверхности ионных кристаллов (щелочно-галоидных кристаллов и оксидов) под воздействием электронного облучения.



Стоят (слева направо): Б.Г. Атабаев, А.С. Овсяницкий, Е.С. Шахурин, Г.Т. Тюлиев; сидят: Е.М. Дубинина, Г.П. Нетишенская, С.С. Еловигов

Интерес к этим работам был обусловлен широким использованием диэлектрических покрытий из этих материалов в электронной технике и технологии, а образование радиационных дефектов и деструкция поверхности покрытий существенно ограничивали срок службы приборов. В проведении исследований принимали участие аспиранты Е.С. Шахурин, О.В. Раховская, Ю.В. Сушкова и Г.Р. Тажиева. Было

установлено, что определяющую роль в этих процессах играет электронно-стимулированная десорбция (ЭСД) атомов и ионов различных компонентов, входящих в состав объектов. С помощью методов электронной Оже-спектроскопии и масс-спектроскопии вторичных частиц явление ЭСД было исследовано в широком диапазоне температур. С.С. Еловиговым были разработаны уникальные методики исследования электронно-стимулированной десорбции и определения сечения процесса с поверхностями бинарных соединений. Благодаря этому оказалось возможным исследование процесса с очень малым сечением. Анализ Оже-спектров показал, что под воздействием электронного облучения с поверхности десорбируется преимущественно анионный компонент, что приводит к обогащению поверхности металлом. Этот факт может быть использован для практических приложений, например, для получения тонких металлических слоев, создания дозированных источников металла, в качестве методики анализа поверхности.

В 1997-2009 гг. в группе под руководством С.С. Еловигова исследовалась практически важная проблема изучения радиационной стойкости различных материалов по отношению к низкоэнергетическому электронному и ионному облучению. В работе аспирантки Е.Ю. Зыковой изучались процессы разрушения ионами и электронами ряда нитридов металлов, которые широко приме-

няются в технических приложениях и как основа нового поколения светодиодов. Исследования показали, что максимальной радиационной стойкостью обладает нитрид бора гексагональной, ромбоэдрической и кубической модификаций, наименьшей – нитрид галлия. Причем был обнаружен синергический эффект: разрушение поверхности значительно (приблизительно на порядок) усиливалось, когда объекты облучаются электронами и ионами одновременно.

В дальнейшем исследования радиационной стойкости были продолжены для целого ряда керамик на основе нитрида бора ( $\text{BN}+\text{SiO}_2$ ,  $\text{BN}+\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Эти работы были инициированы поиском новых материалов, обладающих большой радиационной стойкостью, которые могли бы быть использованы в качестве конструкционных материалов в ионных космических двигателях.

На основе экспериментальных данных были предложены механизмы, которые могут влиять на скорость нормальной и аномальной эрозии керамических узлов космических ионных двигателей. Последние работы группы были посвящены разработке методики электронно-лучевой модификации поверхности диэлектриков и формированию на ней наноразмерных островковых металлических пленок. Подобные объекты интересны для экспериментального изучения особенностей зарядового обмена между ионом и островковой пленкой.

Многие оригинальные идеи и результаты, полученные сотрудниками кафедры в области взаимодействия низкоэнергетических электронов с поверхностью твердых тел, отражены в учебных пособиях, написанных Е.М. Дубининой и М.Б. Гусевой "Физические основы твердотельной электроники" (Изд. МГУ, 1986 г.) и С.С. Еловиковым "Электронная спектроскопия поверхности тонких пленок" (Изд. МГУ, 1992 г.).



С.С. Еловиков и Е.Ю. Зыкова за Оже спектрометром

## ИОННАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССОВ РОСТА ТОНКИХ ПЛЕНОК

Начало работы по этому направлению восходит к 60-м годам, когда была создана по тем временам рекордно высокопереванская электронная пушка и миниатюрный высоковакуумный ионный источник с полым катодом ( Г.В. Спивак, Е.М. Дубинина, М.Б. Гусева, Д.Х. Абдрашитова [«Эффективный эмиттер электронов, использующий разряд с полым катодом» – Изв. АН СССР, сер. Физ., 1971, **35**, №2]). С использованием созданных источников под руководством М.Б. Гусевой было начато систематическое ис-

следование закономерностей и выяснение механизма ионной стимуляции процесса конденсации и роста пленок.



М.Б. Гусева и В.Г. Бабаев положили начало исследованиям ионно-стимулированных процессов на поверхности энергии ионного облучения происходит изменение ближнего порядка в расположении атомов углерода.

Важную роль в развитии исследований ионно-стимулированных процессов сыграло изучение влияния ионного облучения на процессы формирования, структуру и свойства углеродных пленок (Н.Н. Никифорова, Н.Ф. Савченко), которое показало, что в зависимости от энергии ионного облучения ( $E_{Ar^+} = 0 \div 200$  эВ) свойства аморфных углеродных пленок, конденсируемых в условиях ионного облучения, немонотонно изменяются с энергией ионов [«Изменение структуры и свойств углеродных пленок в условиях облучения медленными ионами» – В сборнике «Вопросы атомной науки и техники», серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», 1983, выпуск 2(25), с. 92 – 96)].

Впервые проведено теоретическое описание механизма формирования структуры углеродных кластеров под действием медленных ионов, учитывающего эффекты неупругого взаимодействия ионов с углеродным конденсатом, приводящее к селективному возбуждению электронной подсистемы растущей углеродной пленки. Такой подход позволил объяснить немонотонный характер энергетической зависимости эффекта ионного воздействия осцилли-

Была разработана первая теоретическая модель ионностимулированного зарождения конденсата на поверхности, базирующаяся на представлении об образовании под действием ионов точечных дефектов – центров конденсации, на которых ликвидируется барьер зародышеобразования, а также впервые обнаружена ионная стимуляция поверхностной диффузии (В.Г. Бабаев) [«Адсорбция паров металла в условиях ионного облучения» – Изв. АН СССР, сер. Физ., 1973, **37**, № 12, с. 2596 – 2601]. Быков Ю.В. исследовал ионно-стимулированную конденсацию атомов металла на поверхности ионных кристаллов. Он впервые установил уникальные зависимости эффекта ионной стимуляции от параметров ионного облучения и описал эффект ионной стимуляции эпитаксии [«Effect of ion irradiation on the formation, structure and properties of thin metal films» – Thin Solid Films, 1976, **38**, n. 1, 1–8]. В последующем было установлено, что в селективных интервалах

рующей зависимостью от энергии сечения резонансной перезарядки ионов на углеродных кластерах.



Профессор Г.В. Спивак с сотрудниками лаборатории (1983 г.)

Идентификация ближнего порядка и типа химической связи в аморфных углеродных системах всегда представляла сложную задачу. Для решения этой проблемы В.В. Хвостовым была разработана оригинальная методика обработки Оже-спектров, основанная на методе деконволюции линий углерода для определения плотности электронных состояний в валентной зоне а-С [«Auger spectroscopy studies of amorphous carbon films» - *Surface Sci.Lett.*, 1986, **169**, no. 2, L253 – 258]. С применением этого метода, а также с помощью анализа спектра характеристических потерь энергии электронов была впервые исследована электронная структура карбина – новой аллотропной модификации углерода и доказана его линейно-цепочечная структура [«Electronic structure of carbynes studied by Auger and energy loss spectroscopy», *Carbon*, 1987, **25**, p. 735–738]. Объяснены электронные спектры карбина. Предложена модель структуры карбина, адекватная картине его электронной дифракции, что сыграло решающую роль в утверждении существования третьей аллотропной формы углерода – карбина.

Эти работы положили начало циклу приоритетных пионерских исследований, посвященных развитию методов синтеза и



Аспирантка Савченко Н.Ф. за напылительной установкой «Луч-2» (1982 г.)

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

изучению свойств и структуры карбина. Реализованы методы газоразрядной, лазерной и ионно-стимулированной конденсации карбиновых пленок, предложены способы управления структурой карбина с применением радиационных методов, позволяющие получать различные модификации карбина.

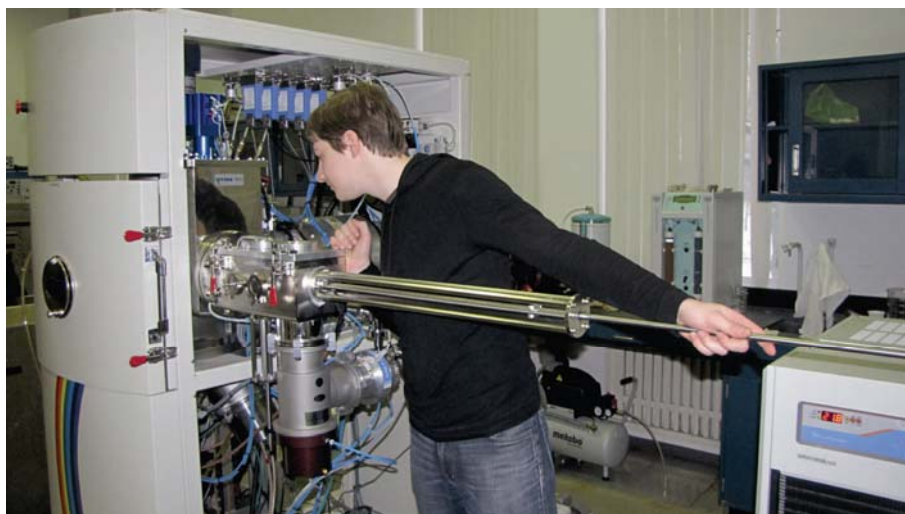


Коллектив лаборатории в 2016 г.: доцент Хвостов В.В., с.н.с. Савченко Н.Ф., н.с. Стрелецкий О.А., м.н.с. Нищак О.Ю., м.н.с. Иваненко И.П.

В 1983 г. были впервые синтезированы углеродные пленки с ГЦК структурой (Н.Ф. Савченко) [«О  $\gamma$ -углероде» - ЖЭТФ, 1984, **87**, вып. 3(9), с. 914–917], возможность существования которой впервые была теоретически обоснована в 60–70-х годах в работах Л.С. Палатника. Экспериментальное исследование атомной и электронной структуры и электрофизических свойств пленок с ГЦК структурой доказало, что это – новая четвертая аллотропная форма углерода с нетрадиционным для углерода типом химической связи, формируемым негибридованными электронными орбиталями. Интерес к этой необычной фазе углерода стимулировал множество теоретических и экспериментальных работ как в нашей стране, так и за рубежом. На кафедре методами электронной спектроскопии и электронной дифракции было установлено, что ГЦК фаза углерода имеет плотность в два раза меньшую, чем у алмаза и близка к нему по твердости. Теоретические расчеты электронной и атомной структуры подтвердили экспериментально наблюдаемые электрофизические и механические свойства ГЦК углерода. Экспериментально обнаружено, что тонкие пленки на основе наночастиц ГЦК углерода имеют проводимость  $n$ -типа. Наличие в ГЦК углероде запрещенной зоны и  $n$ -типа проводимости открывает возможность для решения одной из фундаментальных проблем углеродной электроники.

Развивая углеродную тематику в плане получения углеродных пленок с широким спектром свойств, с 1992 года проводились исследования пленок, получаемых методом лазерного испарения ультрадисперсного алмаза (УДА) (А.Ю. Брегадзе). Исследования их атомной и электронной структуры показали,

что такие пленки имеют в 2–3 раза меньший размер нанокластеров, чем в исходном УДА [«Deposition of thin highly dispersive diamond films by laser ablation» – *Diamond and Related Materials*, 1994, 3, p. 328 – 331].



Универсальная напылительная установка для нанесения низкоразмерных углеродных структур, а также гетероструктур на основе металлов и их оксидов



Аналитическая и технологическая сверхвысоковакуумная установка «Surface Center» (Riber, France) для широкого спектра исследований поверхности

Особый интерес представляют работы, связанные с синтезом  $sp^1$ -фазы углерода в виде нанослоев с ориентированным расположением углеродных цепочек (Н.Д. Новиков). Полученные карбиноподобные пленки, образованные цепочками углеродных атомов, ориентированными перпендикулярно подложке, обладают уникальными электрофизическими и эмиссионными свойствами [«Высокоориентированные пленки  $sp^1$ -углерода» Исследование углерода – успехи и проблемы, Москва, Наука, 2007, с. 35–54]. С точки зрения электроники представляет особый интерес высокая анизотропия электропроводности таких пленок, являющихся диэлектриками в направлениях, перпендикулярных цепочкам, и проводниками с высокой подвижностью электронов – вдоль цепочек,

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

чек. Обнаружена низкая эффективная работа выхода электронов карбиноподобного углерода, что делает возможным создание высокоэффективных холодных эмиттеров и приборов нового поколения на их основе. Это открывает перспективы возрождения вакуумной эмиссионной электроники, превосходящей по своим параметрам твердотельную. Таким образом, обрела реальность идея *C*-троники – углеродной электроники.



Перчаточный бокс для проведения экспериментов в различных газовых средах

удовлетворяющие требованиям технологий микроэлектроники (низкие температуры и давление). Аналитическая база научной группы включает исследовательский сверхвысоковакуумный комплекс электронной спектроскопии поверхности, КР-спектрометр для определения типа связи в углеродных пленках, сканирующий туннельный микроскоп для изучения морфологии и транспортных свойств гетероструктур на основе углерода.



Профессор А.Ф. Александров с ректором МГУ академиком В.А. Садовничим на выставке «Технологии специального назначения», 2012 г.

В научной группе разработаны физические принципы ионных методов синтеза метастабильных форм углерода при низких температурах и давлениях и созданы уникальные ионные источники для реализации этих методов. На их основе создана уникальная установка для синтеза углеродных пленок с широким диапазоном свойств от металлических до диэлектрических. Такая установка позволяет методами ионно-стимулированного импульсно-плазменного осаждения, магнетронного распыления в режимах постоянного и переменного токов и CVD создавать гетероструктуры на основе углерода,

Результаты работ по синтезу и изучению метастабильных форм углерода, созданию наноуглеродных материалов с заданными свойствами и их приложениям нашли отражение в десятках патентов и изобретений, опубликованы более чем в 300 научных статьях российских и международных журналах, монографиях, докладах на всесоюзных, всероссийских и международных конференциях и симпозиумах.

Специальные исследования показали, что карбиноподобные пленки имеют уни-

что карбиноподобные пленки имеют уни-



кальные медико-биологические свойства. Работы по этому направлению возглавляет профессор А.Ф. Александров.

На основе карбиноподобных пленок удалось создать идеальные по биосовместимости покрытия для медицины: в офтальмологии, стоматологии, сердечно-сосудистой хирургии, трансплантологии и т.д. [«Результаты и перспективы применения биосовместимых форм линейно-цепочечного углерода в медицине». Ч. 1-2 – Интеграл, Москва, Энергоинвест М. №№4 – 5]. Все эти материалы и изделия прошли всесторонние исследования в клиниках и показали отличные результаты.

## ЭМИССИОННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Работы по исследованию электронной эмиссии чистых и окисленных металлов проводились на кафедре в конце 50-х и начале 60-х годов прошлого века под руководством Г.В. Спивака. А.С. Игнатов изучил процессы формирования пространственного заряда в трубке с термокатодом. На основе этой работы сконструирован и построен чувствительный манометр. Г.А. Желудевой было проведено исследование сурьмяно-цезиевых фотокатодов. Ее результаты по угловым распределениям фотоэлектронов стали пионерскими и получили заслуженное признание как в нашей стране, так и за рубежом. Е.С. Машкова изучила влияние фазового перехода в сегнетоэлектрике на вторичную электронную эмиссию, а аспирант Г.В. Спивака – А. Гельберг обнаружил изменение работы выхода никеля в точке Кюри.

Важное место в эмиссионной электронике занимают термоэлектронная, вторично-электронная и фотоэлектронная эмиссии. Исследования этих явлений проводились в группе Бориса Борисовича Шишкина. Прежде всего следует отметить его педагогический талант. Обаятельная улыбка Бориса Борисовича привлекала к себе всех. Всегда находилось много студентов, желающих выполнить дипломную работу в его лаборатории. Под его руководством выполнили дипломные работы около ста студентов, защитили докторские диссертации И.Б. Бурибаев и Н.Я. Рухляда, а В.А. Маштакова и И.П. Ли – кандидатские диссертации. Ученики Б.Б. Шишкина работают во многих городах России, в вузах, НИИ и на производстве.

Говоря о вкладе Б.Б. Шишкина в фундаментальную науку и технологии, прежде всего отметим его деятельность по разработке, созданию и внедрению термоэлектронного эмиссионного микроскопа (ТЭЭМ).

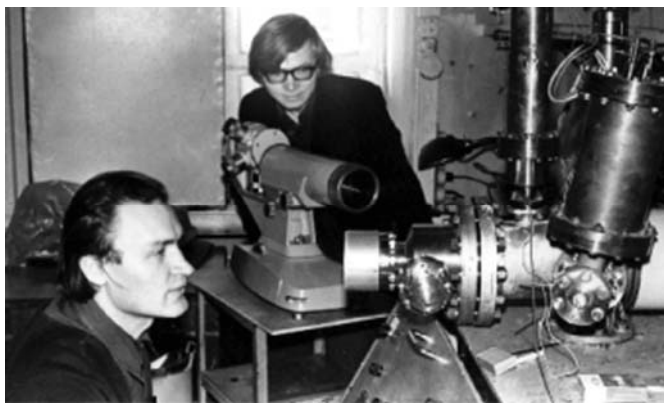
В конце 60-х годов прошлого века была актуальна тема создания аппарата прямого преобразования тепловой энергии в электрическую (ТЭП). Важно было знать процессы, происходящие в вакуумном диоде (генерирующем элементе) на катоде и аноде. Лучше всего для таких исследований подходил ТЭЭМ. Физико-энергетический институт (г. Обнинск) заказал в МГУ на физфаке такой прибор. Он был создан в группе Б.Б. Шишкина и передан заказчику в 1968 г. Работать на ТЭЭМ в 1970 г. был направлен выпускник группы Б.Б. Шишкина Рухляда Н.Я. С помощью ТЭЭМ были смоделированы процессы, происходящие на электродах ТЭП и даны рекомендации для улучшения выходной мощ-

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

ности прибора. Результаты работ были доложены в объединенном докладе от делегации Советского Союза в 1972 г. на Международной конференции в г. Юлихе (ФРГ, Германия). Другой прибор такого типа был внедрен на завод «Плутон» (г. Москва), занимающийся разработкой СВЧ-приборов. ТЭЭМ эффективен для исследований термокатодов при рабочих температурах. С его помощью можно изучать диффузию компонентов и примесей материалов к поверхности, поверхностную диффузию, химические реакции на поверхности, процессы изменения кристаллической структуры материалов – рекристаллизации, фазовые переходы. В 1978 г. ТЭЭМ был применен для исследования влияния фазовых переходов на термоэмиссию аллотропных металлов. Аспирант Н.Я. Рухляда и дипломник А.Г. Трефилов установили скачкообразное изменение работы выхода при фазовом переходе в гафнии. В дальнейшем Рухляда Н.Я. и Ли И.П. зафиксировали скачок работы выхода в тербии.

Усовершенствуя ТЭЭМ, аспирант Н.Я. Рухляда и дипломник А.В. Гостев в 1978 г. разработали метод измерения термоэлектронной эмиссии с нулевым электрическим полем на катоде. Б.Б. Шишкин и И.П. Ли совместно с Н.Б. Брандтом впервые наблюдали электронную эмиссию металлических монокристаллов при воздействии на них мощных ударных волн.

Термоэлектронная эмиссия монокристаллов переходных металлов экспериментально изучена Б.Б. Шишкиным и В.А. Маштаковой. Опыты этих авторов показали, что собственно термоэмиссия происходит при сравнительно



1978 г. На переднем плане – аспирант Рухляда Н.Я. На заднем – дипломник Трефилов А.Г. – за работой на ТЭЭМ

"низких" температурах, а при "высоких" температурах наблюдается новое явление - рекомбинационная электронная эмиссия.

Совместная работа учеников Б.Б. Шишкина Рухляды Н.Я. и Ли И.П. привела к разработке технологии улучшения эмиссионных свойств эффективных термокатодов импульсной плазмой (Z-пинчем).

Работы по термоэмиссии, активно выполнявшиеся в группе Б.Б. Шишкина, продолжают сегодня его ученики. В 1997 году Рухляда Н.Я. с помощью ТЭЭМ открыл фазовые переходы в рутении -  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -превращения. И.П. Ли возглавляет в настоящее время отдел катодной электроники в НИИ «Плутон», являясь заместителем директора этого предприятия по науке. В течении последних лет кафедрой совместно с НИИ «Плутон» был выполнен ряд исследований направленных на создание эффективных катодов для СВЧ устройств. В настоящее время обсуждаются перспективы дальнейшего широкомасштабного сотрудничества кафедры и НИИ «Плутон» в разработке эффективных катодов для СВЧ устройств.

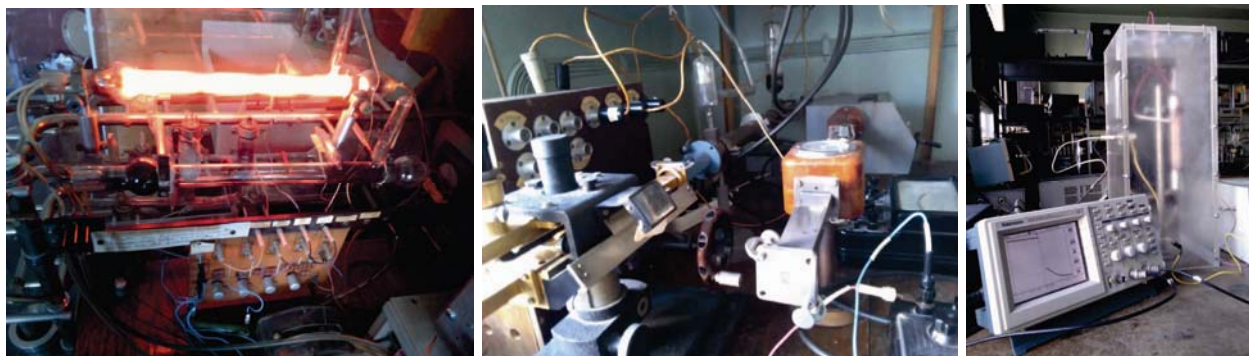
## ПРАКТИКУМЫ КАФЕДРЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

### ПРАКТИКУМ ГАЗОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



Коллектив практикума газовой электроники

- Метод электрических зондов Ленгмюра.
- Деионизация плазмы.
- Эффект Рамзауэра.
- Изучение свойств плазмы с помощью СВЧ радиоволн.
- Газовый разряд.
- Изучение свойств плазмы оптическим методом.



КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ  
**ПРАКТИКУМ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**



Коллектив практикума твердотельной электроники



Установки твердотельного практикума

- Биполярный полупроводниковый транзистор.
- Дискретные элементы полупроводниковой электроники.
- Определение плотности поверхностных состояний в МДП структурах с помощью C-V-метода.

- Полевые транзисторы на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник
- Оптические явления в полупроводниках.
- Получение высокого вакуума и анализ состава остаточных газов.
- Исследование элементного и изотопного состава металлических образцов методом масс спектрометрии вторичных ионов.
- Туннельная спектроскопия углеродосодержащих плёнок.

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРАКТИКУМ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

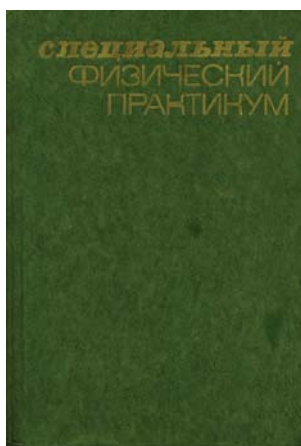
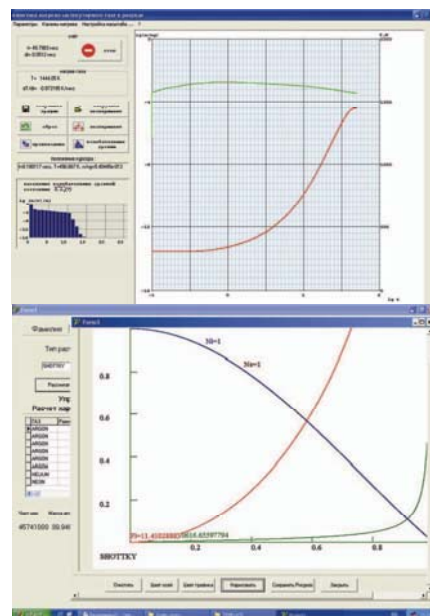


Коллектив практикума «Физические основы плазменных и лучевых технологий»

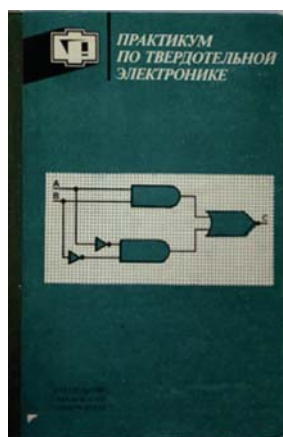
- Расчет электронной структуры углерода методом линейной комбинации атомных орбиталей (ЛКАО).
- Численный расчет концентрации возбужденных атомов в гелии.
- Пространственные характеристики положительного столба разряда постоянного тока.
- Метод оптической актинометрии в применении к химически активной низкотемпературной плазме.
- Моделирование взаимодействия ионов с поверхностью кристаллов.
- Черенковские пучковые неустойчивости в плазме.
- Компьютерное моделирование распыления твердых тел ионным пучком.

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ

- Моделирование взаимодействия электронного пучка с веществом методом Монте-Карло.
- Изучение влияния различных механизмов передачи энергии на кинетику нагрева молекулярного газа.



1977



1984



2000



2012

ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК – 2016

## ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ



Кафедра физической электроники в 1955 году



Кафедра физической электроники в 2016 году

## СПЕЦКУРСЫ КАФЕДРЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

### Спецкурсы для бакалавров

<b>3 курс, весна</b>	Введение в физическую электронику (д.ф.-м.н., проф. А.Ф. Александров)
	Элементарные процессы в ионизованном газе (д.ф.-м.н., проф. В.М. Шибков)
<b>4 курс, осень</b>	Взаимодействие ионов с поверхностью (д.ф.-м.н., проф. В.С. Черныш)
	Физика волновых явлений (часть 1) (д.ф.-м.н., проф. М.В. Кузелев)
	Колебания и волны в плазменных средах (д.ф.-м.н., проф. А.Ф. Александров; к.ф.-м.н., доц. И.Н. Карташов)
	Физические основы электроники твердого тела (к.ф.-м.н., доц. В.В. Хвостов)
	Физика волновых явлений (часть 2) (к.ф.-м.н., доц. И.Н. Карташов)

### Спецкурсы для бакалавров и магистров (4 курс бакалавры, 1 и 2 курсы магистры)

<b>Осень</b>	Кинетика низкотемпературной плазмы (д.ф.-м.н., проф. В.М. Шибков)
	Электронная микроскопия и микроанализ (к.ф.-м.н., с.н.с. А.А. Татаринцев)
	Физические основы газового разряда (д.ф.-м.н., доц. С.А. Двинин)
	Электронно-зондовая диагностика материалов и приборов микроэлектроники (д.ф.-м.н., в.н.с. Э.И. Рау)

### Спецкурсы для магистров (1 и 2 курсы магистров)

<b>1 курс, осень</b>	Методы элементного анализа твердых тел (д.ф.-м.н., проф. В.С. Черныш)
	Физика электронных пучков (д.ф.-м.н., проф. М.В. Кузелев)
	Электронная спектроскопия поверхности и тонких пленок (к.ф.-м.н., ст.преп. Е.Ю. Зыкова)
<b>1 курс, весна</b>	Неупругое взаимодействие ионов с поверхностью (к.ф.-м.н., доц. И.К. Гайнуллин)
	Диагностика импульсной плазмы (к.ф.-м.н., доц. В.А. Черников)
	Дополнительные главы физики газового разряда (д.ф.-м.н., доц. С.А. Двинин)
	Элементы квантовой теории конденсированного состояния вещества (к.ф.-м.н., м.н.с. Ю.Г. Коробова)
	Эмиссионные явления на поверхности (к.ф.-м.н., доц. И.Н. Карташов)
	Разряды в волновых полях (д.ф.-м.н., проф. В.М. Шибков)



## ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК – 2016

<b>1 курс, весна</b>	Практическая полупроводниковая электроника (к.ф.-м.н. А.А. Татаринцев)
	Дополнительные главы электродинамики сред с дисперсией (д.ф.-м.н., проф. М.В. Кузелев)
	Сканирующая зондовая микроскопия в нанoeлектронике (м.н.с. И.П. Иваненко)
<b>2 курс, осень</b>	Оптические свойства плазмы (д.ф.-м.н., проф. В.М. Шибков)
	Физические основы нано- и молекулярной электроники (к.ф.-м.н., доц. В.В. Хвостов)
	Транспортные процессы в низкотемпературной плазме (д.ф.-м.н., в.н.с. В.Л. Бычков)
	Введение в плазменную аэродинамику и плазмо-стимулированное горение (д.ф.-м.н., в.н.с. В.Л. Бычков, к.ф.-м.н., м.н.с. Д.Н. Ваулин)
	Физические основы вакуумных устройств и ускорителей ионных пучков (к.ф.-м.н., с.н.с. К.Ф. Миннебаев; к.ф.-м.н., м.н.с. А.Е. Иешкин)
<b>2 курс, весна</b>	Физика и техника источников плазмы низкого давления (д.ф.-м.н., в.н.с. Е.А. Кралькина)
	Методы синтеза и диагностики наноструктурированных углеродных материалов (к.ф.-м.н., н.с. О.А. Стрелецкий)
	Плазменная СВЧ электроника (д.ф.-м.н., проф. М.В. Кузелев)
	Электронно-стимулированные процессы на поверхности твердых тел (к.ф.-м.н., ст.преп. Е.Ю. Зыкова)

### Спецкурсы для аспирантов

<b>Аспиранты</b>	Электродинамика плазмы и плазмоподобных сред (д.ф.-м.н., проф. А.Ф. Александров; к.ф.-м.н., доц. И.Н. Карташов)
	Физика электронных пучков и СВЧ электроника (д.ф.-м.н., проф. М.В. Кузелев)
	Современные проблемы ионно-пучковых нанотехнологий (д.ф.-м.н., проф. В.С. Черныш)
	Электронная микроскопия и спектроскопия (д.ф.-м.н., в.н.с. Э.И. Рау; к.ф.-м.н., ст.преп. Е.Ю. Зыкова)
	Проблемы физики газового разряда как основы нанотехнологий (д.ф.-м.н., доц. С.А. Двинин)
	Современные проблемы сверхзвуковой плазменной аэродинамики (д.ф.-м.н., проф. В.М. Шибков)
	Углеродные материалы в нанoeлектронике к.ф.-м.н., доц. В.В. Хвостов; к.ф.-м.н., н.с. О.А. Стрелецкий)
	Современные проблемы плазменных технологий (д.ф.-м.н., в.н.с. Е.А. Кралькина)

## КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ 85 ЛЕТ



*Кафедра благодарит ОАО «Шензор» и его Председателя совета директоров, выпускника аспирантуры кафедры физической электроники Андрея Алексеевича Андреева за спонсорскую помощь при подготовке данного издания.*

*Кафедра благодарна также издательскому отделу физического факультета МГУ за помощь в подготовке оригинал-макета данной брошюры.*





ЮБИЛЕЙНЫЙ СБОРНИК - 2016

КАФЕДРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ  
85 ЛЕТ

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2